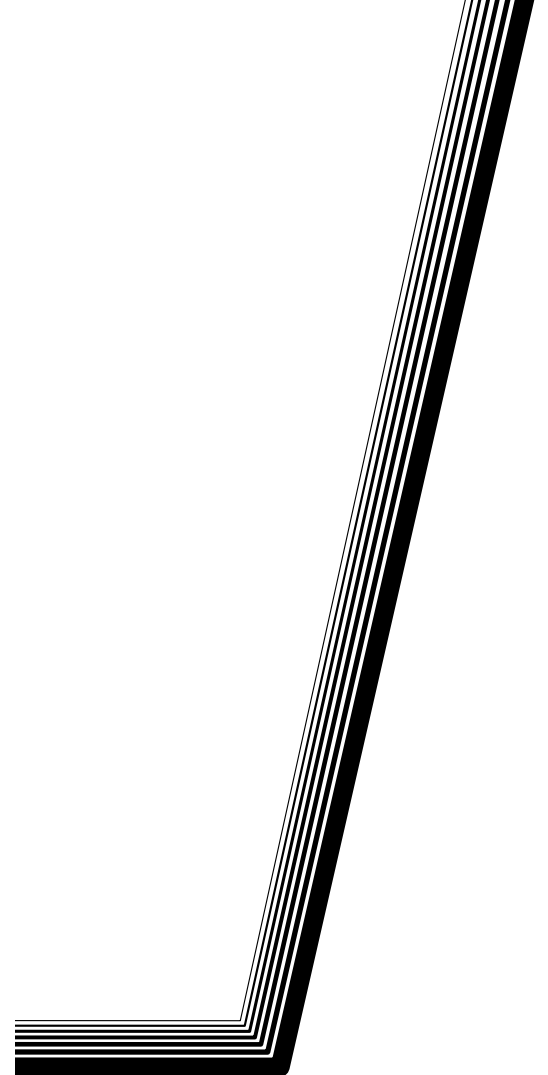


СИБИРСКИЙ ЖУРНАЛ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ



Том 18, № 3

Красноярск 2017

СИБИРСКИЙ ЖУРНАЛ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

Том 18, № 3

Главный редактор

Ковалев Игорь Владимирович,
доктор технических наук, профессор

Заместители главного редактора

Логинов Юрий Юрьевич, доктор
физико-математических наук, профессор

Сенашов Сергей Иванович, доктор
физико-математических наук, профессор

Мурыгин Александр Владимирович,
доктор технических наук, профессор

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Аплеснин С. С., доктор физико-математических
наук, профессор

Головенкин Е. Н., доктор технических наук,
профессор

Ерыгин Ю. В., доктор экономических наук,
профессор

Лаптенко В. Д., доктор технических наук,
профессор

Медведев А. В., доктор технических наук,
профессор

Михеев А. Е., доктор технических наук,
профессор

Москвичев В. В., доктор технических наук,
профессор

Сафонов К. В., доктор физико-математических
наук, доцент

Смирнов Н. А., доктор технических наук,
профессор

Сомов В. Г., доктор технических наук,
доцент

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Васильев С. Н., академик РАН, доктор физико-
математических наук, профессор (Москва)

Дегерменджи А. Г., академик РАН,
доктор физико-математических наук,
профессор (Красноярск)

Дегтерев А. С., доктор технических наук,
профессор (Красноярск)

Калвода Л., кандидат наук, доцент
(Прага, Чехия)

Колмыков В. А., кандидат технических наук,
профессор (Красноярск)

Краточилова И., доктор, доцент (Прага, Чехия)

Краус И., профессор (Прага, Чехия)

Лопатин А. В., доктор технических наук,
профессор (Красноярск)

Лю Т., профессор (Пекин, Китай)

Минкер В., доктор, профессор (Ульм, Германия)

Миронов В. Л., член-корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук,
профессор (Красноярск)

Павера Р., доцент (Братислава, Словакия)

Семенкин Е. С., доктор технических наук,
профессор (Красноярск)

Тестоедов Н. А., член-корреспондент РАН,
доктор технических наук, профессор
(Железногорск)

Фошнер М., доктор, доцент (Марибор, Словения)

Чжанг Ш., доктор (Тяньцзинь, Китай)

Шабанов В. Ф., академик РАН, доктор физико-
математических наук, профессор (Красноярск)

Шайдуров В. В., член-корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук,
профессор (Красноярск)

Швиденко А., доктор инженерных наук,
профессор (Лаксембург, Австрия)

Эйя Х., доктор инженерных наук,
профессор (Тронхейм, Норвегия)

SIBERIAN JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

Vol. 18, No 3

Chief Editor:

Kovalev I. V.

Dr.Sc., Professor

Deputy Chief Editors

Loginov Y. Y., Dr.Sc., Professor

Senashov S. I., Dr.Sc., Professor

Murygin A. V., Dr.Sc., Professor

EDITORIAL BOARD

Aplesnin S. S., Dr.Sc., Professor

Golovenkin E. N., Dr.Sc., Professor

Erygin Y. V., Dr.Sc., Professor

Laptenok V. D., Dr.Sc., Professor

Medvedev A. V., Dr.Sc., Professor

Mikheev A. E., Dr.Sc., Professor

Moskvichev V. V., Dr.Sc., Professor

Safonov K. V., Dr.Sc., Docent

Smirnov N. A., Dr.Sc., Professor

Somov V. G., Dr.Sc., Docent

EDITORIAL COUNCIL

Vasiliev S. N., Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor (Moscow)

Degermendzhi A. G., Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk)

Degterev A. S., Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk)

Kalvoda L., Cand.Sc.-Ing., Associate Professor (Prague, Czech Republic)

Kolmykov V. A., Cand.Sc., Professor (Krasnoyarsk)

Kratochvilova I., Dr.-Ing., Associate Professor (Prague, Czech Republic)

Kraus I., Sc.D., Professor (Prague, Czech Republic)

Lopatin A. V., Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk)

Liu T., Ph.D., Professor (Beijing, China)

Minker W., Dr.-Ing., Professor (Ulm, Germany)

Mironov V. L., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk)

Pawera R., Associate Professor (Bratislava, Slovakia)

Semenkin E. S., Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk)

Testoedov N. A., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor (Zheleznogorsk)

Fošner M., Ph.D. Associate Professor (Maribor, Slovenia)

Zhang S., Ph.D. (Tianjin, China)

Shabanov V. F., Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk)

Shaidurov V. V., Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk)

Shvidenko A., Dr.-Ing., Professor (Laxenburg, Austria)

Oye H., Dr.-Ing., Professor (Trondheim, Norway)

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ

«Сибирский журнал науки и технологий» является научным, производственно-практическим рецензируемым изданием. Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77-70577 от 03.08.2017 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

ISSN 2587-6066.

Подписной индекс в каталоге «Пресса России» – 39263.

Зарегистрирован в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ).

Включен в базу данных Ulrich's Periodicals Directory американского издательства Bowker.

Входит в перечень журналов ВАК по следующим группам научных специальностей:

01.04.00 – физика;

05.02.00 – машиностроение и машиноведение;

05.07.00 – авиационная и ракетно-космическая техника;

05.13.00 – информатика, вычислительная техника и управление;

08.00.00 – экономические науки.

Выпускается с 2000 года. До 2002 года журнал носил название «Вестник Сибирской аэрокосмической академии имени академика М. Ф. Решетнева» («Вестник САА»), до мая 2017 года – «Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева».

Каждый выпуск журнала включает четыре раздела:

1 раздел. Математика, механика, информатика.

2 раздел. Авиационная и ракетно-космическая техника.

3 раздел. Технологические процессы и материалы.

4 раздел. Экономика.

Статьи публикуются бесплатно после обязательного рецензирования и при оформлении их в соответствии с требованиями редакцией (www.vestnik.sibsau.ru). Журнал выходит 4 раза в год.

Электронная версия журнала представлена на сайте Научной электронной библиотеки (<http://www.elibrary.ru>) и сайте журнала (www.vestnik.sibsau.ru)

При перепечатке или цитировании материалов из журнала «Сибирский журнал науки и технологий» ссылка обязательна.

Учредитель и издатель

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева» (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

АДРЕС РЕДАКЦИИ, УЧРЕДИТЕЛЯ И ИЗДАТЕЛЯ:

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, Российская Федерация, 660037, Красноярск, проспект имени газеты «Красноярский рабочий», 31, П-416. Тел./ факс (391)291-90-19

E-mail: vestnik@sibsau.ru

Редактор: О. А. ПЛЕХОВА

Редактор английского текста С. Г. ЭФА

Оригинал-макет и верстка О. В. Булатниковой

Подписано в печать 30.10.2017. Формат 70×108/16.

Бумага офсетная. Печать плоская. Усл. печ. л. 23,3.

Уч.-изд. л. 29,2. Тираж 1000 экз. Заказ 22/263. С 234/17.

Редакционно-издательский отдел СибГУ им. М.Ф. Решетнева.

Отпечатано в редакционно-издательском центре СибГУ им. М.Ф. Решетнева.

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31.

Дата выхода в свет: 05.12.2017. Свободная цена

INFORMATION FOR AUTHORS AND SUBSCRIBERS

Siberian Journal of Science and Technology is a research, production and practical peer-reviewed journal. Included by the Higher Attestation Commission of the Russian Federation in the Index of Leading Russian Peer-Reviewed Journals and Periodicals, in which significant scientific dissertation results should be published when applying for a Dr.Sc. degree.

The journal is the official periodical of Reshetnev Siberian State University of Science and Technology.

Certificate of Registration as a Mass Media Resource. Certificate: PI No. FC 77-50577, dated 03 August 2017, given by Federal Supervision Agency for Information Technology, Communications and Mass Media.

The Journal is included in the following subscription catalogue 39263 – Pressa Rossii.

The journal is registered in the Russian Science Citation Index (RSCI). The journal is indexed in the database of Ulrich's Periodicals Directory.

The journal was first published in 2000. Prior to 2002 it had the title *Vestnik Sibirskoi aerokosmicheskoi akademii imeni akademika M. F. Reshetneva (Vestnik SAA)*, prior to may 2017 it had the title *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M. F. Reshetneva (Vestnik SibGAU)*.

The Journal is recommended for publishing the main results of research when applying for Cand. Sc. degree and Dr. Sc. degree upon the following specialties:

01.04.00 – physics;

05.02.00 – machine engineering and science of mechanics;

05.07.00 – aviation and spacecraft engineering;

05.13.00 – management, computer technology and informatics;

08.00.00 – economics. Each issue consists of four parts.

Each issue consists of four parts:

Part 1. Mathematics, Mechanics, Computer Science.

Part 2. Aviation and Spacecraft Engineering.

Part 3. Technological Processes and Material Science.

Part 4. Economics Aerospace Industry.

Papers prepared in accordance with the editorial guidelines (www.vestnik.sibsau.ru) are published free of charge after being peer reviewed.

The journal is published four times a year.

An online version can be viewed at <http://www.elibrary.ru>

Siberian Journal of Science and Technology should be cited when reprinting or citing materials from the journal.

CONTACTS. Website: www.vestnik.sibsau.ru

Address: Reshetnev Siberian State University of Science and Technology.

31, Krasnoyarsky Rabochoy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation.

Tel./fax (391)291-90-19; e-mail: vestnik@sibsau.ru

Editor O. A. PLEKHOVA, Editor (English Language) S. G. EFA

Layout original O. V. BULATNIKOVA

Signed (for printing): 30.10.2017. Format 70×108/16.

Offset Paper. Print flat. 23,3. Published sheets 29,2.

1000 copies. Order 22/263. С 234/17.

Printing and Publication Department

Reshetnev University.

Printed in the Department of copying and duplicating equipment Reshetnev University.

31, Krasnoyarsky Rabochoy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation.

Date of publication: 05.12.2017. Free price

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ 1. МАТЕМАТИКА, МЕХАНИКА, ИНФОРМАТИКА

Антропов Н. Р., Агафонов Е. Д. Идентификация параметров гидравлического сопротивления модели гидравлической сети	492
Данько В. П., Карнаух В. В., Титлов А. С. Изучение особенностей гидродинамики в аппаратах с подвижной насадкой	499
Дмитриев М. А. Возможные варианты повышения криптостойкости алгоритмов шифрования на основе конструкции Ниберга	505
Корнеева А. А., Чернова С. С., Шишкина А. В. Непараметрические алгоритмы восстановления взаимно неоднозначных функций по наблюдениям	510
Крат Н. М., Савин А. А. Влияние рассогласования импедансов в тракте передачи сигнала при калибровке задержек имитаторов навигационных сигналов	520
Кузнецов А. А., Кишкан В. В. Исследование графов модифицированной пузырьковой сортировки на основе высокопроизводительных вычислений	525
Куприн А. Г., Медведев А. В. О задаче коллокации геостационарных спутников Земли	530
Ноженкова Л. Ф., Исаева О. С. Проектирование предметно-ориентированной инфраструктуры имитационного моделирования бортовой аппаратуры космического аппарата	538
Сенашов С. И., Савостьянова И. Л., Филюшина Е. В. О кручении параллелепипеда вокруг трех осей	545

РАЗДЕЛ 2. АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Акзигитов А. Р., Стаценко Н. И., Писарев Н. С., Ефимова А. Н., Андронов А. С. Мониторинг воздушных судов в высоких широтах посредством использования спутниковой связи «Иридиум» на основе телеметрического терминала ASC-6	552
Бирюков В. И., Назаров В. П., Царапкин Р. А. Алгоритм оценки запасов устойчивости рабочего процесса в камерах сгорания и газогенераторах жидкостных ракетных двигателей	558
Верхогляд А. Г., Куклин В. А., Макаров С. Н., Михалкин В. М., Халиманович В. И. Автоматизированная система обезвешивания для наземной отработки солнечных батарей космических аппаратов	567
Карцан И. Н., Ефремова С. В., Шангина Е. А., Логачева А. И., Горев Е. С. Исследование влияния рабочей температуры на характеристику излучения активных фазированных антенных решеток	575
Кравчуновский А. П., Драганюк М. Н., Зуев Д. М., Скоробогатов С. А., Мовчан П. В. Студенческая пикоспутниковая платформа SibQube: разработка прототипа корпуса пикоспутника класса RocketQub	580
Морозов Е. А., Трифонов С. В., Салтыков М. Ю., Мурыгин А. В., Тихомиров А. А. Подсистема физико-химических реакторов минерализации отходов для биолого-технических систем жизнеобеспечения космического назначения	585
Серяков А. В. Исследование течений в паровом канале коротких линейных тепловых труб	592
Соколовский А. В., Вейсов Е. А., Ратушняк В. Н., Рыжков Д. Н., Высоцкий С. В. Аппаратная реализация аппаратуры потребителя ГНСС	604
Трофимчук Д. А., Бежаев Ю. А., Иванов В. В., Кочура С. Г., Максимов И. А. Средства моделирования электростатических разрядов в системе «стационарный плазменный двигатель – система преобразования и управления»	609
Федченко А. С., Мизрах Е. А., Лобанов Д. К. Исследование топологий нагрузочных устройств с двойным регулированием для испытаний систем электропитания космических аппаратов	617
Штабель Н. В., Самотик Л. А., Мизрах Е. А. Метод повышения точности контроля сопротивления изоляции при испытаниях системы электропитания космического аппарата	628

РАЗДЕЛ 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛЫ

Дружинина А. А., Лаптенко В. Д., Лаптенко П. В., Мурыгин А. В. Исследование возможности использования отклоняющей системы для компенсации влияния магнитных полей при электронно-лучевой сварке	634
Золотова О. П., Бурков С. И. Влияние толщины металлического слоя на характеристики SH-волн в структурах Me/ZnO/Me/алмаз и Me/ALN/Me/алмаз	642

Крушенко Г. Г., Исеева О. А. Наномодифицирование полимерного связующего с целью повышения свойств углепластиковых материалов	651
Ярцев Е. Н., Назаров В. П., Теряев Н. С. Реализация автоматизированной системы изготовления трубопроводов в производстве ракетных двигателей	658

РАЗДЕЛ 4. ЭКОНОМИКА

Аврамчикова Н. Т., Данильченко Ю. В., Пучкин М. Б. Проектное управление инновационной деятельностью в территориях опережающего социально-экономического развития	664
Ерыгин Ю. В., Борисова Е. В. Коммерциализация инновационного потенциала предприятий оборонно-промышленного комплекса: формы и методы сетевого взаимодействия с объектами инновационной инфраструктуры	673
Сочнева Е. Н., Воронин Е. А., Зябликов Д. В. Социально-экономическая политика Красноярского края как региона инновационного развития	680

CONTENTS

PART 1. MATHEMATICS, MECHANICS, COMPUTER SCIENCE

Antropov N. R., Agafonov E. D. Identification of hydraulic resistance parameters in hydraulic network model	492
Danko V. P., Karnauh V. V., Titlov A. S. Study of hydrodynamics features in the apparatuses with movable nozzle	499
Dmitriev M. A. Possible options to improve cryptographic reliability of algorithms based on Nyberg construction	505
Korneeva A. A., Chernova S. S., Shishkina A. V. Non-parametric algorithms of reconstruction of mutually ambiguous functions from observations	510
Krat N. M., Savin A. A. Impedance mismatch influence at internal delay of navigation signal simulator calibration	520
Kuznetsov A. A., Kishkan V. V. Using high-performance computations for studying modified bubble-sort graphs	525
Kuprin A. G., Medvedev A. V. To geostationary collocation problem	530
Nozhenkova L. F., Isaeva O. S. Designing the problem-oriented infrastructure for simulation modeling of spacecraft onboard equipment	538
Senashov S. I., Savostyanova I. L., Filyushina E. V. About torsion of parallelepiped around three axis	545

PART 2. AVIATION AND SPACECRAFT ENGINEERING

Akzigitov A. R., Stacenko N. I., Pisarev N. S., Efimova A. N., Andronov A. S. Aircraft monitoring in remote areas via the low-orbit satellite communications system “Iridium” along with the GSM data transmission through ASC-6 telemetry terminal	552
Biryukov V. I., Nazarov V. P., Tsarapkin R. A. The algorithm for estimating reserves of the working process stability in combustion chambers and gas generators of liquid rocket engines	558
Verhoglyad A. G., Kuklin V. A., Makarov S. N., Mihalkin V. M., Halimanovich V. I. Automated weight compensation system for ground-based tryout of space vehicle solar panels	567
Kartsan I. N., Efremova S. V., Shangina E. A., Logacheva A. I., Gorev Y. S. Operating temperature and its influence on the radiation of phased antenna arrays	575
Kravchunovsky A. P., Draganyuk M. N., Zuev D. M., Skorobogatov S. A., Movchan P. V. Student picosatellite platform SibQube: development of prototype structure of PocketQub class picosatellite	580
Morozov Ye. A., Trifonov S. V., Saltykov M. Yu., Murygin A. V., Tikhomirov A. A. Subsystem of physico-chemical reactors of mineralizing wastes for space application bio technical life support systems	585
Seryakov A. V. The study of the flow in the vapour channel of short linear heat pipes	592
Sokolovskiy A. V., Veisov E. A., Ratushniak V. N., Rizhkov D. N., Vysotsky S. V. Hardware implementation of the unit of the GNSS consumer	604
Trofimchuk D. A., Bezhayev Y. A., Ivanov V. V., Kochura S. G., Maximov I. A. Simulation means of electrostatic discharges in the system “stationary plasma thruster – transformation and control system”	609
Fedchenko A. S., Mizrah E. A., Lobanov D. K. Study of dual control electronic loads for spacecraft electrical power system tests	617
Shtabel N. V., Samotik L. A., Mizrah E. A. Improvement of insulation resistance measurement accuracy during spacecraft power system tests	628

PART 3. TECHNOLOGICAL PROCESSES AND MATERIAL SCIENCE

Druzhinina A. A., Laptinok V. D., Laptinok P. V., Murygin A. V. Investigation of the possibility of using a deflecting system for magnetic fields impact compensation during electron-beam welding	634
Zolotova O. P., Burkov S. I. Metal layer thickness influence on the dispersion characteristics of SH-waves in the structures Me/ZnO/Me/diamond and Me/ALN/Me/diamond	642
Krushenko G. G., Iseeva O. A. Nano modification of polymer binder with the aim of improving the properties of carbon fibre materials	651
Yartsev E. N., Nazarov V. P., Teryaev N. S. Implementation of automated system for manufacturing of pipelines of rocket engines	658

PART 4. ECONOMICS AEROSPACE INDUSTRY

Avramchikova N. T., Danilchenko Yu. V., Poochkin M. B. Project management of innovative activity in TOSER	664
Erygin Yu. V., Borisova E. V. Commercialization innovative potential of defense industry enterprises: forms and methods of network interaction with objects of innovative infrastructure	673
Sochneva E. N., Voronin E. A., Zyablikov D. V. Social and economic policy of Krasnoyarsk territory as a region of innovative development	680

РАЗДЕЛ
PART
1



МАТЕМАТИКА,
МЕХАНИКА,
ИНФОРМАТИКА

MATHEMATICS,
MECHANICS,
COMPUTER SCIENCE



ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МОДЕЛИ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СЕТИ

Н. Р. Антропов¹, Е. Д. Агафонов^{2*}

¹Сибирский федеральный университет

Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: agafonov@gmx.de

Представлена разработка алгоритма идентификации коэффициентов гидравлического сопротивления в модели гидравлической сети. Решение задачи актуально для предприятий, осуществляющих транспорт жидких углеводородов в водопроводных и тепловых сетях, и может быть применено при расчете технологических режимов эксплуатации трубопроводных сетей. Сложность трубопроводных систем, неопределенность и изменчивость их параметров на практике не позволяют описывать их состояние, минуя процесс идентификации. Используемая модель сети представляет собой систему нелинейных уравнений, составленную в соответствии с законами Кирхгофа для трубопроводной сети. Уравнения в системе формируются на основании законов сохранения для узлов и в результате учета действующих напоров и падения напоров для независимых контуров сети. Для решения такой системы традиционно применяют алгоритмы, составленные в соответствии с методом Ньютона или его модификациями, в частности, метод последовательных приближений. Такие алгоритмы обладают рядом недостатков, среди которых – неустойчивость процедуры решения и чувствительность к выбору начальных условий. Решение системы сопровождается настройкой коэффициентов с использованием нелинейного метода наименьших квадратов (МНК). В случае больших размерностей процедура МНК может быть неустойчивой из-за переопределенности системы. Предложено использовать подход к непараметрическому оцениванию решения системы уравнений. Применяется модель регрессионного типа относительно невязок уравнений системы, полученных в результате подстановки в уравнения измеренных величин переменных. При этом идентификация также производится одновременно с оценкой решения системы уравнений. В качестве алгоритма идентификации параметров используется модификация адаптивной процедуры Кифера–Вольфовица. Применение перечисленных алгоритмических процедур рассматривается на примере трехконтурной трубопроводной сети с одним действующим активным напором. Иллюстрируется процесс адаптивной подстройки коэффициентов гидравлического сопротивления. Делается вывод о применимости предложенной процедуры при решении практических задач идентификации.

Ключевые слова: идентификация, оценка параметров, гидравлическое сопротивление.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 3, P. 492–498

IDENTIFICATION OF HYDRAULIC RESISTANCE PARAMETERS IN HYDRAULIC NETWORK MODEL

N. R. Antropov^{1*}, E. D. Agafonov²

¹Siberian Federal University

79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: agafonov@gmx.de

The work is devoted to the identification of hydraulic resistance coefficients in hydraulic network model. The problem raised in the paper is relevant for enterprises dealing with either pipeline transport of fluid hydrocarbons, or water supply and central heating. The proposed algorithm can be implemented for corresponding technological modes calculation and prediction. Complexity of real pipeline networks, uncertainty and instability of their parameters make parameters identification procedure indispensable. The network model under research is a system of nonlinear equations, drawn up in accordance with Kirchhoff's laws for pipeline networks. Equations describe laws of flows conservation for nodes as well as pump heads and head drops along independent circuits of the network. To solve such system one traditionally implements Newton's method or its modifications, for instance the successive approximation method. Mentioned methods have numerous disadvantages like instability and sensibility to initial approximation of the roots.

The system of equations solving is accompanied with their parameters tuning usually with the Nonlinear Least Square Method. Again, the method can be instable due to overdefined and large-scale problem statement. In the paper we propose to substitute solution of the system with nonparametric estimation of the solution. We implement regression type estimate with respect to residuals of the equations calculated for measured data sample. Simultaneously parameters of the equations are identified. Modification of Kiefer–Wolfowitz procedure is used as an identification algorithm. Identification is performed with simultaneous evaluation of the solution of the system of equations. The use of appropriate algorithms is considered at three-loop pipeline network with a single active pressure. Numerical experiments with proposed algorithm demonstrate its applicability for practical identification problems solution.

Keywords: identification, parameter estimation, flow resistance.

Введение. В научной и отраслевой литературе предлагаются различные подходы к построению моделей гидравлических сетей [1; 2]. Многочисленные работы, такие как [3], посвящены методологии построения динамических моделей процессов, происходящих в гидравлических сетях. Зачастую, речь идет о моделях, основанных на привлечении законов гидродинамики, выраженных в системах уравнений в частных производных для описания распределенных систем. Подход, который используется в таких работах, требует исчерпывающей информации о физических характеристиках перекачиваемой жидкости, характере ее течения, внутреннем профиле и геометрической конфигурации трубопровода, исчерпывающей информации о функционировании насосных агрегатов. Во множестве случаев такие модели сложны в вычислительном плане, требуют учета неизвестных, часто неизмеримых или непредсказуемо меняющихся во времени и в пространстве параметров. Известны также исследования в области построения имитационных моделей процессов в трубопроводах, в которых недостаток априорных сведений преодолевается самым способом построения моделей совместно с упрощением их структуры [4].

Функционирование современных трубопроводных систем сопровождается сбором данных о технологических параметрах, таких как массовый или объемный расход, дифференциальный напор, давление. Измерение параметров требуется для функционирования средств автоматизированного управления, в частности, диспетчерского контроля. При этом надежность и эффективность управления технологическим процессом трубопроводного транспорта нефти и газа напрямую зависит от качества и точности математических моделей технологических процессов, являющихся основной и неотъемлемой частью автоматизированных систем управления. Построение математических моделей рассматривается в терминах теории идентификации [5].

Один из основных подходов к построению моделей трубопроводных систем основывается на представлении структуры гидравлической системы в виде плоского связного орграфа с определенным набором вершин (узлов), ребер (ветвей) и граней (контуров) и позволяет решать задачи стационарного потокораспределения. Модель в рамках такого подхода представляет собой большую систему нелинейных уравнений, составленную в соответствии с законами Кирхгофа для трубопроводной сети [6; 7]:

$$\begin{aligned} c_{11}x_1 + \dots + c_{1n}x_n &= q_1, \\ \dots \\ c_{k-1,1}x_1 + \dots + c_{k-1,n}x_n &= q_{k-1}, \\ c_{k1}s_1|x_1|^{\beta_1-1}x_1 + \dots + c_{kn}s_n|x_n|^{\beta_n-1}x_n &= h_1, \\ \dots \\ c_{n1}s_1|x_1|^{\beta_1-1}x_1 + \dots + c_{nn}s_n|x_n|^{\beta_n-1}x_n &= h_{n-k+1}, \end{aligned} \quad (1)$$

где n – количество участков в графе сети; k – количество узлов; x_j , $j=1, 2, \dots, n$, – расход по j -й трубе; q_i , $i=1, 2, \dots, k-1$, – приток в узле; s_j , $j=1, 2, \dots, n$, – гидравлическое сопротивление соответствующей трубы; h_i , $i=1, 2, \dots, n-k+1$, – сумма действующих напоров с учетом знака по всем дугам i -го контура; β – коэффициент в законе зависимости величины падения напора от значения расхода; $c_{ij} = \{-1, 0, +1\}$ определяется по первому или второму закону Кирхгофа. Для второго закона Кирхгофа и для нелинейных уравнений $c_{ij} = \{-1, +1\}$ (в зависимости от направления обхода), если j -й участок входит в цикл, соответствующий i -му нелинейному уравнению, либо $c_{ij} = 0$. Система уравнений (1) имеет единственное решение [8].

Построение модели (1) связано с решением двух задач:

1) нахождение неизвестных значений расходов сети при заданных значениях активных напоров (прямая задача);

2) настройка параметров гидравлического сопротивления – идентификация параметров гидравлического сопротивления (обратная задача).

По модели (1) на предприятиях, эксплуатирующих трубопроводные сети, производится расчет некоторого множества возможных технологических режимов работы сети, которые с той или иной вероятностью могут быть реализованы. По результатам моделирования вычисляются значения расходов каждой из труб и значения активных напоров сети, необходимых для обеспечения заданного отбора в узлах. Такой подход позволяет производить управление режимами работы сети.

Основным алгоритмом решения системы уравнений (1), применяемым на практике, является модифицированный метод последовательных приближений [9]. Данный алгоритм является модификацией метода Ньютона с более высоким показателем скорости сходимости при достаточно произвольном выборе начального приближения.

При этом точность решения прямой задачи в значительной степени зависит от точности известных значений параметров гидравлического сопротивления. Если значения параметров известны неточно, то решение может быть далеким от действительности. В настоящий момент для решения задачи идентификации параметров гидравлического сопротивления применяется метод наименьших квадратов, либо задача сводится к эквивалентной задаче линейного программирования [10]. Применение метода наименьших квадратов к системе (1) для идентификации параметров гидравлического сопротивления приводит к переопределенной системе нелинейных уравнений. Решение такой системы уравнений относится к классу некорректных задач, так как полученная система может и не иметь решений.

На практике установлено, что такой подход позволяет производить настройку параметров гидравлического сопротивления только в случае небольших размерностей (для сетей с количеством участков не более 200). Для сетей больших размерностей не всегда удается получить решение с приемлемой точностью для всех коэффициентов гидравлического сопротивления [11]. Кроме того, на практике в каналах связи и регистрирующей аппаратуре присутствуют случайные помехи аддитивного и мультипликативного типа. Применение метода наименьших квадратов, в случае наличия помех и выбросов в выборках измерений, приводит к снижению качества идентификации, что свойственно данному классу методов [12].

В связи с этим разработка алгоритмов идентификации параметров гидравлического сопротивления, обеспечивающих необходимую точность и помехоустойчивость, является актуальной задачей. В настоящей статье в качестве подхода к идентификации параметров гидравлического сопротивления предлагается использовать модификацию алгоритма Кифера–Вольфовица [13] в приложении к идентификации многосвязных систем [14; 15]. Идентификация параметров производится с одновременной оценкой решения системы уравнений (1).

Алгоритм идентификации параметров гидравлического сопротивления с одновременной оценкой решения. В качестве алгоритма идентификации предлагается использовать алгоритм, основанный на алгоритме Кифера–Вольфовица [13]. В качестве метода решения системы уравнений в алгоритме используется метод генерации решений [14].

Введем следующие обозначения: γ – коэффициент, удовлетворяющий условиям Роббинса–Монро [16]; l – размерность системы; f_i , $i = \overline{1, l}$ – i -е уравнение системы; $V = \{h[t], x[t]\}$, $t = \overline{1, N}$, – обучающая выборка.

Алгоритм выглядит следующим образом:

1. Оценка параметров системы на m -м шаге:

$$s_j[m] = s_j[m-1] - \gamma_j^{(i)}[m] \cdot f_i(h^{(i)}[m], x^{(i)}[m], s^{(i)}[m-1]), \quad j = \overline{1, l}, \quad (2)$$

2. Вычисление невязок системы на m -м шаге:

$$\varepsilon_j[m] = f_j(h^{(j)}[m], x^{(j)}[m], s^{(j)}[m]), \quad j = \overline{1, l}. \quad (3)$$

3. Оценка решения системы уравнений на m -м шаге:

$$x_j(m) = \frac{\sum_{t=1}^m x_j[t] \prod_{j=1}^l \Phi\left(\frac{0 - \varepsilon_j[t]}{c_j}\right)}{\sum_{t=1}^m \prod_{j=1}^l \Phi\left(\frac{0 - \varepsilon_j[t]}{c_j}\right)}, \quad j = \overline{1, l}, \quad (4)$$

где ядерная функция $\Phi(\cdot)$ и параметры размытости c_j , $j = 1, 2, \dots, l$, удовлетворяют условиям сходимости [12].

4. Проверка критерия останова:

если

$$\sqrt{(s_j(m) - s_j(m-1))^2} < \delta_1$$

или

$$\sum_{j=1}^l \sqrt{(x_j(m) - x_j(m-1))^2} < \delta_2,$$

то алгоритм останавливается, иначе $m = m + 1$ и переход на первый пункт. Здесь δ_1 и δ_2 – некоторые заданные положительные значения.

Исходная трубопроводная сеть, генерация обучающей выборки. Рассмотрим применение предложенного подхода на примере трехкольцевой трубопроводной сети, изображенной на рис. 1 [17].

На рис. 1 стрелки в контурах отвечают выбранным направлениям обхода. В цепи имеется одна активная ветвь с действующим напором H . Жирными линиями обозначены дуги дерева, тонкими – хорды. Номера дуг заданы таким образом, что первые номера получили дуги дерева, а оставшиеся – хорды.

Число дуг $n = 10$, узлов $k = 8$, размерность системы $l = 10$. Все трубы, кроме шестой и седьмой, стальные и удовлетворяют квадратичному закону гидравлического сопротивления, шестая и седьмая – пластмассовые, для них $\beta = 1,774$. Величина напора $h = 8,3$.

Система уравнений для такой сети, составленная в соответствии законами Кирхгофа для трубопроводной сети и моделью распределения потоков в виде $h = s x^\beta$ (параметризованная система), примет следующий вид:

$$\begin{aligned} -x_1 + x_8 &= -89, \\ x_1 + x_2 - x_4 &= 16,5, \\ -x_2 + x_5 &= 19,2, \\ -x_5 + x_9 &= 23,1, \\ -x_3 + x_4 + x_7 - x_9 &= 0, \\ -x_7 + x_{10} &= 17,4, \\ x_6 - x_{10} &= 12,8, \\ 0,00147|x_1|x_1 + 0,00431|x_3|x_3 + \\ + 0,00174|x_4|^{0,774}x_4 + 0,00174|x_8|^{0,774}x_8 &= h, \\ 0,0023|x_2|x_2 + 0,00174|x_4|^{0,774}x_4 + \\ + 0,00522|x_5|x_5 + 0,00174|x_9|x_9 &= 0, \\ 0,00431|x_3|x_3 + 0,00514|x_6|x_6 + \\ + 0,00514|x_7|x_7 + 0,00522|x_{10}|x_{10} &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

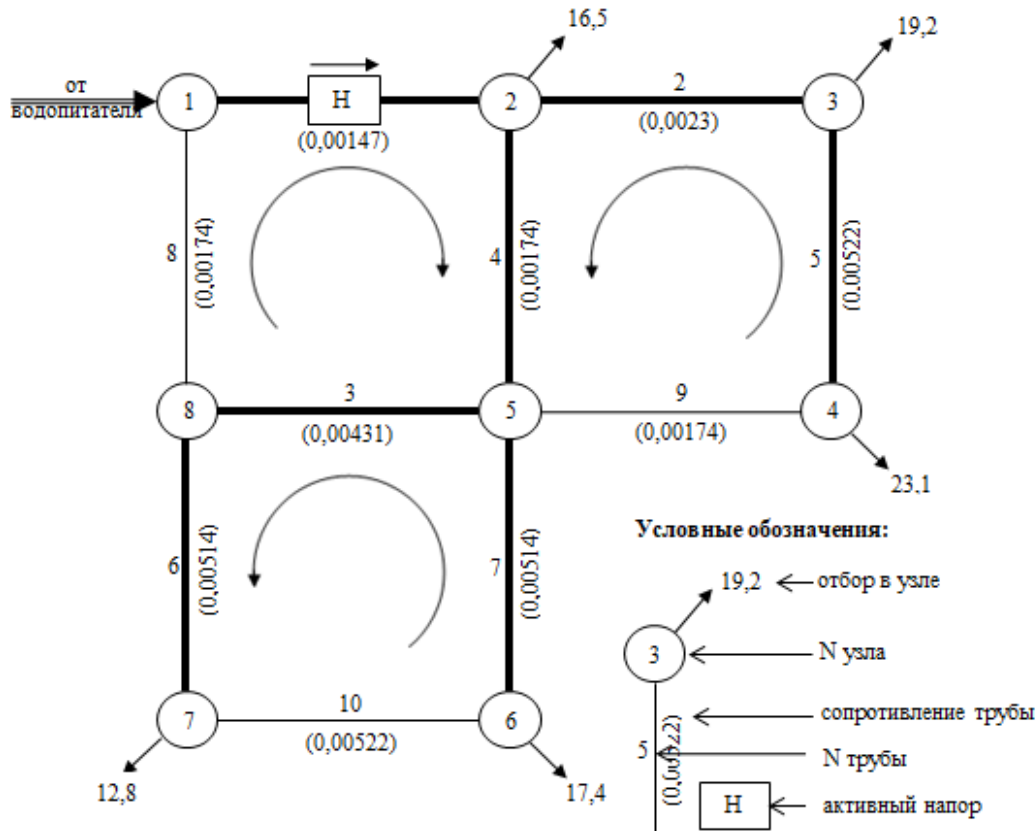


Рис. 1. Схема трехкольцевой трубопроводной сети

Fig. 1. Layout of three-loop pipeline network

В качестве входных воздействий (активного напора h) определим

$$\tilde{h}[t] = h \cdot (1 + 2 \cdot p \cdot (\mu[t] - q)), \quad t = \overline{1, N},$$

где p – разброс выборочных значений от начального состояния; $\mu[t]$, $t = \overline{1, N}$, – последовательность случайных чисел, равномерно распределенных на отрезке $[0, 1]$; q – параметр сдвига.

Преобразуем выборочные значения по формуле

$$h[t] = \tilde{h}[t] \cdot (1 + 2 \cdot s \cdot (r[t] - q)), \quad t = \overline{1, N},$$

где s – шум на объекте; $r[t]$, $t = \overline{1, N}$, – последовательность случайных чисел, равномерно распределенных на отрезке $[0, 1]$.

Генерацию выборочных значений выхода (расходов) $x[t] = (x_1[t], \dots, x_l[t])$ при заданном входе $h[t]$ осуществим в ходе решения системы (5) методом Ньютона.

Таким образом, в качестве исходной обучающей выборки вектора состояний трубопроводной сети примем выборку $\{h[t], x[t]\}$, $t = \overline{1, N}$.

Результаты идентификации. Численное исследование алгоритма проведем при следующих параметрах:

- начальное значение активного напора $h = 8,3$;
- разброс выборки от начального состояния $p = 25\%$;
- уровень шума $s \in \{5\%, 10\%, 25\%\}$;

- параметр сдвига $q = 0,5$;
- объем обучающих выборок $N \in \{25, 50, 100\}$;
- коэффициент $\gamma = 1/m$, где m – шаг.

Численное исследование алгоритма идентификации с одновременной оценкой параметров для разного уровня шума в зависимости от такта идентификации m приведено ниже. Так как графики оценки параметров схожи, то приведены графики оценки параметра лишь для одного (первого) параметра гидравлического сопротивления s_1 (рис. 2–4). На графиках s_1^* обозначает истинное значение параметра гидравлического сопротивления s_1 .

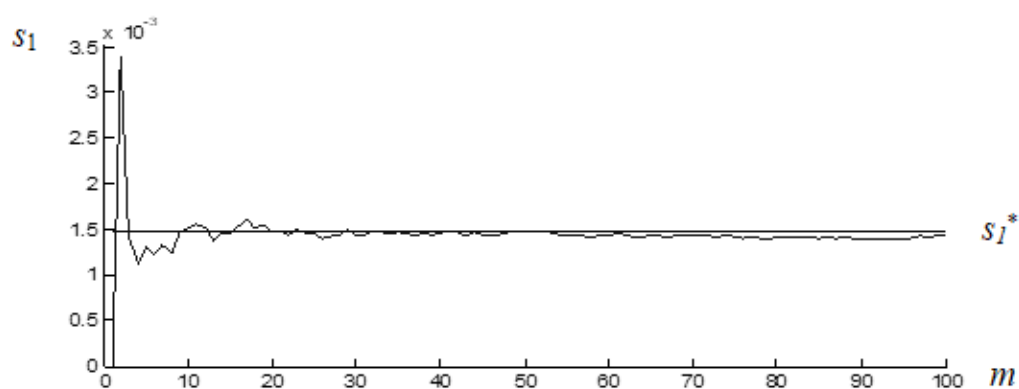
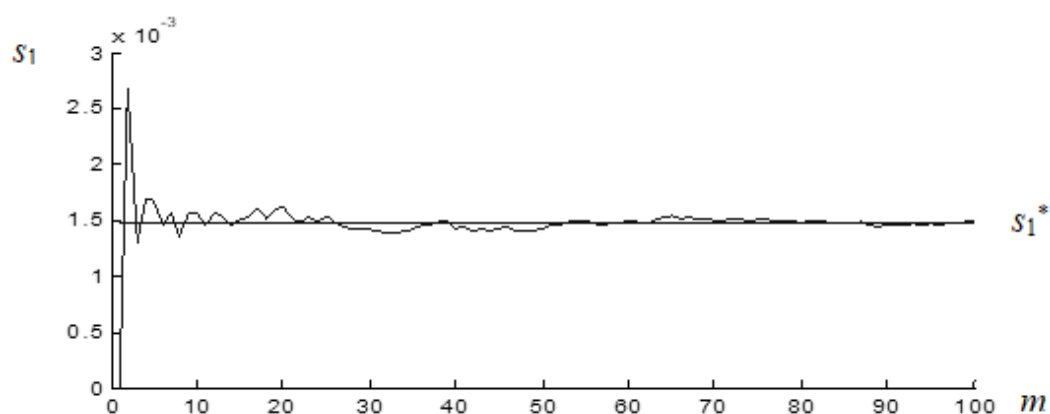
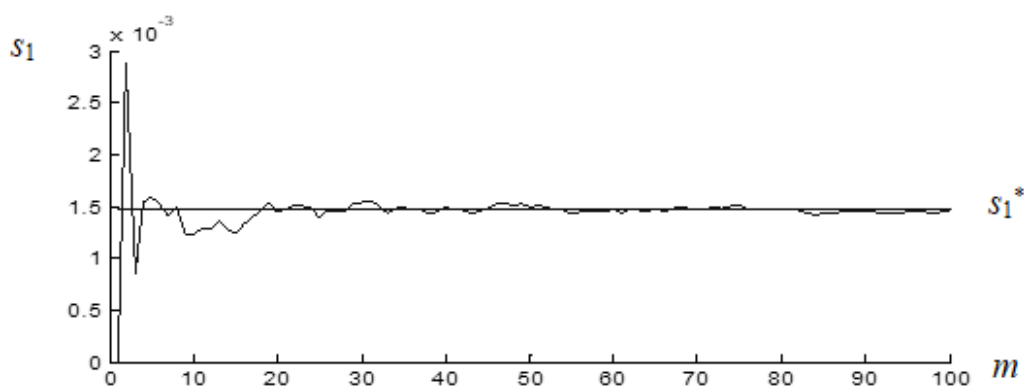
В соответствии с рис. 2–4 можно сделать вывод, что найденные оценки параметра s_1 стремятся к своим истинным значениям и, начиная с пятого шага, практически остаются на одном уровне. Наблюдается достаточно высокая помехоустойчивость алгоритма оценки параметров.

В качестве критерия качества оценки решения использовался следующий критерий (евклидова норма отклонения найденного решения от истинного):

$$W = \sum_{j=1}^l \sqrt{|x_j - x_r|^2},$$

где x_j – оценка решения; x_r – истинное решение.

Результаты оценки решения представлены в таблице, где приведена ошибка идентификации W для разного объема выборки N и уровня шума S в каналах измерения.

Рис. 2. Оценка параметра гидравлического сопротивления s_1 при $S = 5\%$ Fig. 2. Hydraulic resistance estimate s_1 vs. iteration for noise amplitude $S = 5\%$ Рис. 3. Оценка параметра гидравлического сопротивления s_1 при $S = 10\%$ Fig. 3. Hydraulic resistance estimate s_1 vs. iteration for noise amplitude $S = 10\%$ Рис. 4. Оценка параметра гидравлического сопротивления s_1 при $S = 25\%$ Fig. 4. Hydraulic resistance estimate s_1 vs. iteration for noise amplitude $S = 25\%$

Результаты расчета критерия качества оценки решения

$S = 5\%$			
N	25	50	100
W	0,09636	0,07330	0,05282
$S = 10\%$			
N	25	50	100
W	0,17085	0,13315	0,08306
$S = 25\%$			
N	25	50	100
W	0,34195	0,29205	0,22395

С увеличением объема обучающей выборки точность оценки решения увеличивается, что свидетельствует о сходимости алгоритма. Наличие помехи в каналах измерения негативно сказывается на работе соответствующих оценок.

В целом по ряду экспериментов была установлена достаточно высокая точность при относительно небольших объемах обучающих выборок и устойчивость к шуму, вплоть до достаточно больших значений помехи.

Заключение. Рассмотрен подход к идентификации параметров гидравлического сопротивления с одновременной оценкой решения системы уравнений для гидравлической сети. Применение предложенного подхода позволит избежать трудностей, связанных с применением метода наименьших квадратов: переопределенность системы уравнений, чувствительность к выбросам. Рассмотренная процедура идентификации параметров гидравлического сопротивления обеспечивает высокую помехоустойчивость, приемлемую скорость и точность идентификации.

Планируется, что дальнейшие исследования будут включать анализ данных и построение модели реальной функционирующей гидравлической сети.

Библиографические ссылки

1. Лурье М. В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа. М. : Нефть и газ, 2003. 335 с.
2. Басниев К. С., Дмитриев Н. М., Розенберг Г. Д. Нефтегазовая гидромеханика. М. ; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2005. 544 с.
3. Кассина Н. В. Математическое моделирование динамики гидравлических систем с использованием методов аналитической механики и теории нелинейных колебаний : дис. ... канд. физ.-мат. наук. Нижний Новгород : ННГУ, 2006. 118 с.
4. Трофимов В. В., Тарасенко В. П., Машченко В. И. Автоматизированное управление магистральными нефтепроводами. Томск : Изд-во Том. ун-та, 1994. 247 с.
5. Eykhoff P. System Identification: Parameter and State Estimation. Chester, England : Wiley, 1974, 555 p.
6. Селезнев В. Е., Алешин В. В., Прялов С. Н. Математическое моделирование трубопроводных сетей и систем каналов: методы, модели и алгоритмы : монография. М. ; Берлин : Директ-Медиа, 2014. 694 с.
7. Логинов К. В., Мызников А. М., Файзуллин Р. Т. Расчет, оптимизация и управление режимами работы больших гидравлических сетей // Математическое моделирование. 2006. Т. 18, № 9. С. 92–106.
8. Файзуллин Р. Т. О решении нелинейных алгебраических систем гидравлики // Сибирский журнал индустриальной математики. 1999. Т. 2, № 2. С. 176–178.
9. Мызников А. М. Решение больших систем нелинейных уравнений применительно к задачам расчета гидравлических, тепловых и электрических сетей // Математические структуры и моделирование. 2003. Вып. 11. С. 15–19.
10. Мызников А. М. Моделирование и идентификация параметров сложных гидравлических сетей :

дис. ... канд. физ.-мат. наук. Тюмень : ТюмГУ, 2005. 116 с.

11. Мызников А. М. Уточнение коэффициентов сопротивления в сложных гидравлических сетях по результатам ограниченного числа измерений // Теплофизика и аэромеханика. 2005. Т. 12, № 3. С. 513–516.
12. Медведев А. В. Основы теории адаптивных систем : монография / СибГАУ. Красноярск, 2015. 526 с.
13. Kiefer J., Wolfowitz J. Stochastic estimation of the maximum of a regression function // Ann. Math. Statist. 1952. Vol. 23, № 3. P. 462–466.
14. Красноштанов А. П. Комбинированные многосвязные системы. Новосибирск : Наука, 2001. 176 с.
15. Красноштанов А. П. Метод генерации решений на многосвязных системах в условиях неопределенности : дис. ... д-ра техн. наук / САА. Красноярск, 2001. 295 с.
16. Robbins H., Monro S. A stochastic Approximation Method // Ann. Math. Statist. 1951. Vol. 22, № 3. P. 400–407.
17. Агафонов Е. Д., Антропов Н. Р. Об оценке решения системы уравнений в задаче построения модели гидравлической сети // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. № 3. С. 110–117.

References

1. Lur'e M. V. *Matematicheskoe modelirovanie protsessov truboprovodnogo transporta nefi, nefteproduktov i gaza* [Mathematical Modeling of Oil, Fuels, and Gas Pipeline Transport Processes]. Moscow, Neft' i gaz Publ., 2003, 335 p.
2. Basniev K. S., Dmitriev N. M., Rozenberg G. D. *Neftegazovaya gidromekhanika* [Hydrodynamics of Oil and Gas]. Moscow, Izhevsk, Institut komp'yuternykh issledovaniy Publ., 2005, 544 p.
3. Kassina N. V. *Matematicheskoe modelirovanie dinamiki gidravlicheskih sistem s ispol'zovaniem metodov analiticheskoy mekhaniki i teorii nelineynykh kolebaniy* [Mathematical Modeling of the Dynamics of Hydraulic Systems Using Methods of Analytical Mechanics and the Theory of Nonlinear Oscillations. PhD diss]. Nizhny Novgorod, NNSU Publ., 2006, 118 p.
4. Trofimov V. V., Tarasenko V. P., Mashchenko V. I. *Avtomatizirovannoe upravlenie magistral'nyimi nefteprovodami* [Automation Control of Trunk Pipelines]. Tomsk, TSU Publ., 1994, 247 p.
5. Eykhoff P. System Identification: Parameter and State Estimation. Chester, England: Wiley, 1974, 555 p.
6. Seleznev V. E., Alechin V. V., Pryalov S. N. *Matematicheskoe modelirovanie truboprovodnykh setey i sistem kanalov: metody, modeli i algoritmy* [Mathematical Modeling of Pipeline Networks and Cannel Systems: Methods, Models, and Algorithms]. Moscow, Berlin, Direkt-Media Publ., 2014, 694 p.
7. Loginov K. V., Myznikov A. M., Fayzullin R. T. [Calculation, Optimization and Control Modes of Operation of Large-scale Hydraulic Networks]. *Matematicheskoe modelirovanie*. 2006, Vol. 18, No. 9, P. 92–106 (In Russ.).

8. Fayzullin R. T. [On the Solution of Nonlinear Algebraic Systems of Hydraulics]. *Siberian Journal of Industrial Mathematics*. 1999, Vol. 2, No. 2, P. 176–178 (In Russ.).
9. Myznikov A. M. [Solution of Large Systems of Nonlinear Equations Applied to Problems of Calculating Hydraulic, Thermal and Electrical Networks]. *Matematicheskie struktury i modelirovanie*. 2003, No. 11, P. 15–19 (In Russ.).
10. Myznikov A. M. *Modelirovanie i identifikatsiya parametrov slozhnykh gidravlicheskikh setey: dis. kand. fiz.-mat. nauk* [Modeling and Identification of Parameters of Complex Hydraulic Networks. PhD diss.]. Tyumen', 2005, 116 p.
11. Myznikov A. M. [Specification of Drag Coefficients in Complex Hydraulic Networks Based on the Results of a Limited Number of Measurements]. *Teplofizika i aeromekhanika*. 2005, Vol. 12, No. 3, P. 513–516 (In Russ.).
12. Medvedev A. V. *Osnovy teorii adaptivnykh system* [Fundamentals of the Theory of Adaptive Systems]. Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2015, 526 p.
13. Kiefer J., Wolfowitz J. Stochastic evaluation of the maximum of a regression function. *Ann. Math. Statist.*, 1952, Vol. 23, No. 3, P. 462–466.
14. Krasnoshtanov A. P. *Kombinirovannye mnogovyaznye sistemy* [Combined Multiply Connected Systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2001, 176 p.
15. Krasnoshtanov A. P. *Metod generatsii resheniy na mnogovyaznykh sistemakh v usloviyakh neopredelenosti: Dis. Doct. Tekhn. Nauk* [The Method of Generating Solutions on Multiply Connected Systems Under Uncertainty. Dr. Tech. Sci. diss.]. Krasnoyarsk, 2001, 295 p.
16. Robbins H., Monro S. A stochastic Approximation Method. *Ann. Math. Statist.* 1951, Vol. 22, No. 3, P. 400–407.
17. Agafonov E. D., Antropov N. R. [On Estimation of Hydraulic Network Equation System]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2014, No. 3, P. 110–117 (In Russ.).

© Антропов Н. Р., Агафонов Е. Д., 2017

STUDY OF HYDRODYNAMICS FEATURES IN THE APPARATUSES WITH MOVABLE NOZZLE

V. P. Danko^{1,2*}, V. V. Karnauh³, A. S. Titlov⁴¹Plekhanov Russian University of Economics
360, Severnaya Str., Krasnodar, 350002, Russian Federation²Kuban State Technological University
2, Moskovskaya Str., Krasnodar, 350072, Russian Federation³Donetsk National University of Economy and Trade named after Mykhajlo Tugan-Baranovskogo
31, Schorsa Str., Donetsk, 83050⁴Odessa National Academy of Food Technologies
112, Kanatnaya Str., Odessa, 65039, Ukraine

*E-mail: vladislav.danko@mail.ru

Apparatuses for the heat and mass transfer processes must be designed so that they have a maximum contact surface. Classification of heat-mass exchange apparatuses provides geometric features of the apparatus and the hydrodynamic condition they create. However, the main trend which remains dominant in the design of such apparatus is to create a thin film of liquid on the surface of the nozzle.

The work was aimed at choosing the solution in which the MN of the heat-mass exchange apparatuses can be used to implement the contact handling process of gases and liquids with density values clarification of the nozzle elements (ρ_{ne}) and the column dynamic height (H_{cm}) and obtain the specified calculated dependences which describe the hydrodynamics and mass transfer in the apparatuses with a movable nozzle, that is to create bases for engineering calculations.

Research methods were theoretical study and experimental studies on heat and mass transfer devices with movable nozzle.

The best ranger for mass transfer processes implementation is that of ρ_{nell} ($\rho = 200\text{--}700 \text{ kg/m}^3$), which is distinguished by a wide working area according to w_g , acceptable values of fluid withdrawal and a relatively small dynamic layer height. Within the described mode, we can distinguish the area $w_g \cong 4.7\text{--}6.0 \text{ m/s}$, where there is no dependence of H_p on w_g .

Specified calculated dependence obtained which describes the hydrodynamics and heat and mass transfer in the apparatuses with a movable nozzle.

Keywords: movable nozzle, fluidization, heat-mass exchange apparatus, critical speed, loss of pressure in the work area, dynamic height of nozzle layer, stationary mode.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 3. С. 499–504

ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ГИДРОДИНАМИКИ В АППАРАТАХ С ПОДВИЖНОЙ НАСАДКОЙ

В. П. Данько^{1,2*}, В. В. Карнаух³, А. С. Титлов⁴¹Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова
Российская Федерация, 350002, г. Краснодар, ул. Северная, 360²Кубанский государственный технологический университет
Российская Федерация, 350075, г. Краснодар, ул. Московская, 2³Донецкий национальный университет экономики и торговли имени М. Туган-Барановского
83050, г. Донецк, ул. Щорса, 31⁴Одесская национальная академия пищевых технологий
Украина, 65039, г. Одесса, ул. Канатная, 112

*E-mail: vladislav.danko@mail.ru

Аппараты для проведения процессов тепломассообмена должны конструироваться так, чтобы у них была максимально развитая поверхность контакта. Классификация теплообменных аппаратов (ТМА) предусматривает как геометрические особенности аппарата, так и создаваемую в них гидродинамическую обстановку. Однако основная тенденция при конструировании таких аппаратов – создание тонкой пленки жидкости на поверхности насадки – остается доминирующей. Целью работы – выбрать решения, при которых ТМА с РН может быть использован для реализации процессов контактной обработки газов и жидкостей с уточнением значений плотности элементов насадки ($\rho_{эл}$) и динамической высоты столба (H_{cm}), а также получение уточненных расчетных зависимостей, описывающих гидродинамику и тепломассоперенос в аппаратах с подвижной насадкой АРН, т. е. создать базы для инженерных расчетов. Методами исследования были теоретическое изучение и экспериментальное исследование на натурных образцах тепломассообменных аппаратов

с подвижной насадкой. Было установлено, что лучшим для реализации массообменных процессов представляется диапазон плотности элементов насадки $\rho_{ne} = 200\text{--}700 \text{ кг/м}^3$, отличающийся широким диапазоном рабочей скорости w_g , приемлемыми значениями вынесенной жидкости и сравнительно небольшой динамической высотой слоя. Диапазон $2,5 < w_g < 6,0 \text{ м/с}$ обеспечивает возможность устойчивой эксплуатации АРН в режиме высоких нагрузок. Практическая значимость заключается в получении уточненных расчетных зависимостей, описывающих гидродинамику и тепломассоперенос в аппаратах с подвижной насадкой.

Ключевые слова: подвижная насадка, псевдооживление, тепломассообменный аппарат, критическая скорость, потеря напора в рабочей зоне, динамическая высота насадочного слоя, стационарный режим.

Introduction. The defining feature of heat and mass transfer processes, which occurs in the three-phase flows, is the interaction phase, which determines the value of the interfacial surface. Therefore, apparatuses for the heat and mass transfer processes must be designed so that they have a maximum contact surface. Classification of heat-mass exchange apparatuses (HMEA) provides geometric features of the apparatus and the hydrodynamic condition they create. However, the main trend which remains dominant in the design of such apparatus is to create a thin film of liquid on the surface of the nozzle.

Apparatuses with a movable nozzle (AMN) were developed in relation to the implementation process of dedusting and degassing and absorption in a number of countries: Canada, the USA, Germany, Japan, CIS-countries [1; 2]. AMN advantages over other types of contact devices, which determined their widespread occurrence: steady operation in the polluted environments of self-cleaning nozzle surfaces and walls of casing, low sensitivity of the device characteristics to sudden load fluctuations of gas and liquid; indiscriminateness to the initial liquid distribution, which is important for industrial AMN; high lateral uniformity simplifying scalability; a wide range of workload (in [3–7] a value q_l up to $200 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ is reported) and w_g up to 8 м/с at an empty AMN intersection); high intensity of exchange processes in the layer; constructive design simplicity; compactness; low weight and cost of the nozzle.

So far published information about the interaction of the three phases in the HMEA varies by the difference in the representation quality and experimental data discrepancies in all major aspects of the movable layers behaviour, so that its practical use in the engineering calculations is complicated. The study of the quite complex

“gas–liquid–solid” system behaviour remains largely experimental. Prospects of AMN use for evaporative water cooling require special consideration. AMN is advisable to apply for the organization of such mass transfer processes in which the main resistance of mass transfer is focused in the gas phase, typical for the process of evaporation cooling in the cooling towers [4].

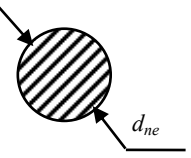
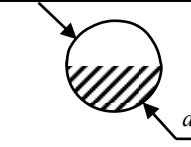
Therefore, the work was aimed at choosing the solution in which the MN of the HMEA can be used to implement the contact handling process of gases and liquids with density values clarification of the nozzle elements (ρ_{ne}) and the column dynamic height (H_{dh}) and obtain the specified calculated dependences which describe the hydrodynamics and mass transfer in AMN, that is to create bases for engineering calculations [8–12].

Studying of evaporative water cooling processes was carried. Studying of evaporative water cooling processes was carried on a laboratory model using different nozzle elements (see table).

From a scientific and practical point of view, the issue concerning the nature of the transit of nozzle layer from a stationary to a moving condition seems important. The issue is complex and poorly studied. Typical modes of movable nozzles (MN) behaviour in the apparatuses are shown in fig. 1.

Fixed layer porosity does not depend on the load of the gas and the liquid. Traditionally, the critical transition velocity (w_0 , w_0') is determined by visual pseudo-fluidization curve analysis that is described by the dependence $\Delta p = (w_g, q_l)$. We conducted its specification by constructing selective $La (w_g, q_l)$ under the following conditions: $H_{dh} = 0,1 \text{ м}$, $d_{ne} = 0,04 \text{ м}$, $\rho = 300 \text{ кг/м}^3$, $q_l = 15 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ (fig. 2).

Studied nozzle elements characteristics

№	NE type	Nozzle material	Geometry	ρ_{ne} , kg/m ³	Note
			d_{ne} , mm		
1		Foamed polypropylene	40.1	248	Commercialization of elements
2			40.3	305	
3			36.6	335	
4			35.6	367	
5		Empty celluloid ball which is partly filled with water	37.1	100–1000 in increments of 100 units	Size ρ_{ne} for the empty element 91 kg/m ³

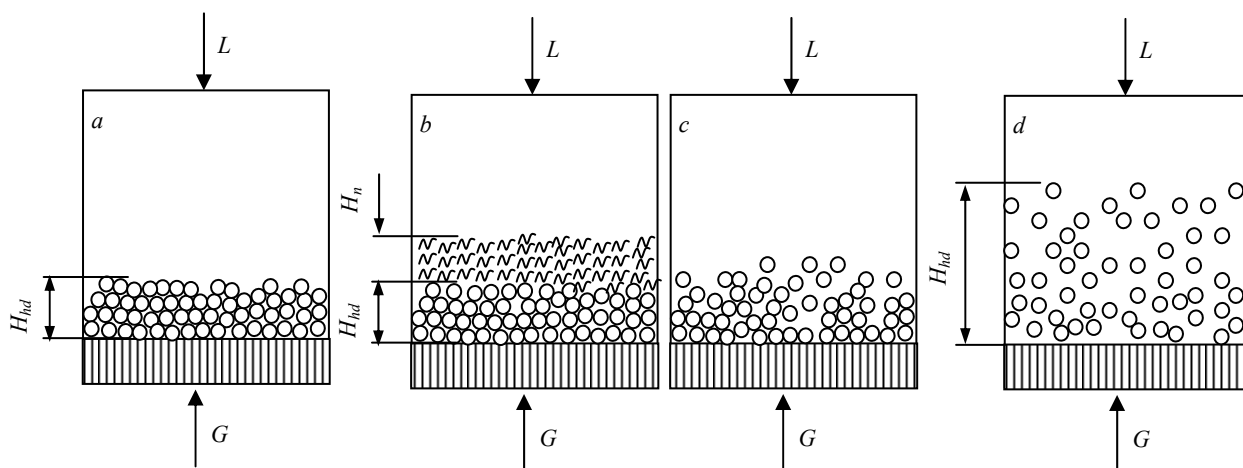


Fig. 1. Typical AMN modes: *a* – stationary; *b* – stationary nozzle flooding; *c* – initial pseudo-fluidization; *d* – developed pseudo-fluidization

Рис. 1. Характерные режимы АПН: *a* – стационарный; *b* – захлебывание стационарной насадки; *c* – начальное псевдооживление; *d* – развитое псевдооживление

Speed w_g is given to the empty column crossing; fixed (1, *a*) and initially compacted layer of nozzle elements (1, *b*) having the ability to expand is considered. Value w_g^* : $w_{отр}$ – the maximum speed at which the curves coincide Δp for fixed and movable layers; w_3 – the beginning of stationary nozzle flooding; w_0 , w_0' – the beginning of pseudo-fluidization; w_1 – the beginning of active pseudo-fluidization; w_i – inversion beginning. Let us specify some definitions through the variety of existing formulations for w_g^* : w_3 corresponds to the intensive growth Δp , layer turbidity, foam formation atop of the layer (partially inverted cocurrent). For the fixed layer speed w_3 is unchanged for specific loadings; for an extending layer w_3 depends on the porosity and cannot be described by the known dependencies; w_0 is the minimum gas velocity at which steady vertical oscillations of several adjacent NE are observed; w_1 corresponds to the active movement and mixing of NE; w_i is the beginning of NE inversion – their concentration near restrictive gates. The latter mode is almost immediately transformed into “upper” NE flooding, which is typical for the fixed layer (fig. 1, *b*).

Value w_0' is clearly recorded on vibrocurve $L_a(w_g)$ as a leap ($\cong 20$ dB or 30 %) and mild stated on fluidization curve (column walls vibroacceleration is defined by the movable nozzles state). Almost constant vibroacceleration level ($L_a = 5.5 w_g^{0.08}$) corresponds to the stationary layer state. The NE transition to movable state was much more difficult, as compared to the traditional presentation. If $w_g \cong w_0'$ then the described unstable pseudo-stationary NE states are formed during periodic movement of an individual NE (layer alteration with changing porosity) at a constant load. Their duration ranges from tens of seconds to several minutes. The layer structure is changing and fluid retention therein varies, i. e. the w_0' value is characterized by a certain range of existence. The width of this range depends on the initial layer density which is determined by NE own weight and the action of external loads and vibrations. For example, for NE with $\rho_{ne} = 300 \text{ kg/m}^3$ and $d_{ne} = 0,037 \text{ m}$, this value is 0.4 m/s.

We found that the elements with $\rho_{ne} < 200 \text{ kg/m}^3$ transferred to a moving state, bypassing flooding in a stationary state, for $\rho_{ne} > 200 \text{ kg/m}^3$ pseudo-fluidization is carried out in pseudo-stationary flooding condition of the extending layer; for $\rho_{ne} > 700 \text{ kg/m}^3$ this pattern persists for larger values of H_p , and the part of liquid is taken outside of the layer and placed on top of its upper limit as the layer of foam with thickness H_n over 0.02 meters.

Gas and liquid layer load effecting movable nozzles retaining ability $H_{dh} = 0.1 \text{ m}$ is shown in fig. 3.

The best range to implement mass transfer processes seems to be that of ρ_{neII} ($\rho_{ne} = 200\text{--}700 \text{ kg/m}^3$). Partial fixed layer flooding precedes the beginning of pseudo-fluidization; the nature of the transition determines the entire future behaviour of the system. The speed of the apparatus starting to flood w_3 is quite high ($\approx 6 \text{ m/s}$); liquid withdrawal ΔG_l from the working area is slow until the speed value is w_3 . This range differs by a wide work area of speed w_g , acceptable values of fluid withdrawal ΔG_l and a relatively small dynamic height of the layer H_l .

Regarding this area let us consider the characteristic pseudo-fluidization modes:

1. $0 < w_g \leq 2.0 \text{ m/s}$ – Stationary system state with characteristic local restructuring of fixed layer structure and some porosity growth. Linear growth $H_l(w_g)$ until the beginning of the pseudo-fluidization speed w_0' with the progressive flooding of the fixed reconstructed layer.

2. $2.0 < w_g \leq 2.5 \text{ m/s}$ – Initial pseudo-fluidization mode (transitional mode). There is a characteristic peak H_p by the speed of gas w_0' (fig. 3, *a*) with the consequent restoration to the previous value; the system is unstable, the part of the layer remains stationary and its periodic restructuring occurs. Fluid retention for $q_l < 5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (fig. 3, *b*) in active pseudo-fluidization mode decreases to values which are characteristic of the stationary layer. This is a border q_l^* for cooling towers with movable nozzle (CTMN) related to layer drainage; here CTMN operation is not feasible, despite the liquid being in the layer for a long time.

3. $2.5 < w_g \leq 6.0$ m/s – Developed pseudo-fluidization mode. The entire nozzle layer is movable, the system is homogeneous. Comparison of system characteristics with the similar mode for the zone ρ_{nel} shows that the new transition patterns to mobility impacted the behaviour of the system as a whole: the initial flooding state is supported. However, it does not further develop with the increase of w_g to the developed flooding due to a mechanism that compensates the layer expansion. This kind of situation when the initial flooding supported in a wide range of w_g , provides the possibility of stable AMN operation in the high loads mode. Within the described mode, we can distinguish the area $w_g \approx 4.7\text{--}6.0$ m/s, where there is no dependence of H_l on w_g . This new area precedes a sharp increase of H_l .

4. $6.0 < w_g \leq 8.0$ m/s. In fact, that is the previous mode with a sharp increase of flooding component. Con-

ventionally, it can be called a movable layer flooding mode, noting a significant difference from the same mode with a stationary nozzle. Whereas, under the latter conditions, the flooding mode means the practical impossibility of further employment, but concerning the apparatuses with a movable nozzle this possibility remains, due to the liquid capacity of the apparatus and very high intensity of the process.

Processing of experimental information. The most important hydrodynamic characteristics of cooling towers with movable nozzle (CTMN), which are required for engineering calculations, are critical speeds (w_0' , w_1), pressure loss in the working area (Δp), fluid retention (H_l) and dynamic layer height (H_d). This information allows selecting the operating mode of heat-mass exchange apparatus (HMEA), calculating the height of the columns and fan power [13–15].

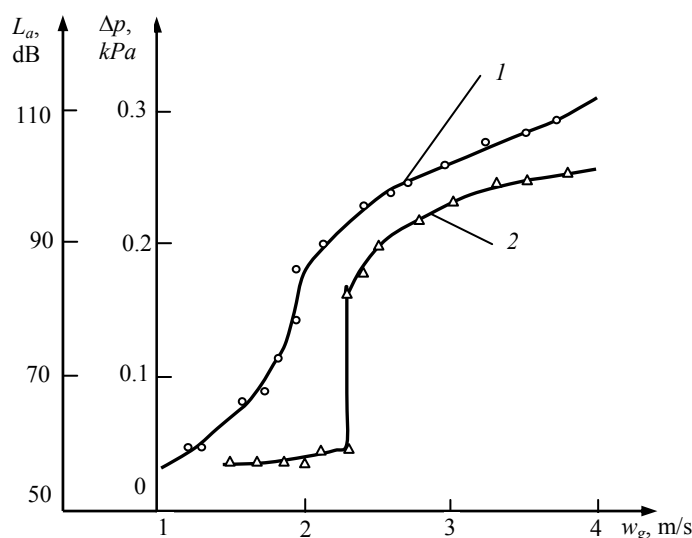


Fig. 2. Experimental dependences: 1 – pseudo-fluidization curve $\Delta p = f(w_g)$; 2 – vibrocurve $L_a = f(w_g)$

Рис. 2. Экспериментальные зависимости: 1 – кривая псевдооживления $\Delta p = f(w_g)$; 2 – виброкривая $L_a = f(w_g)$

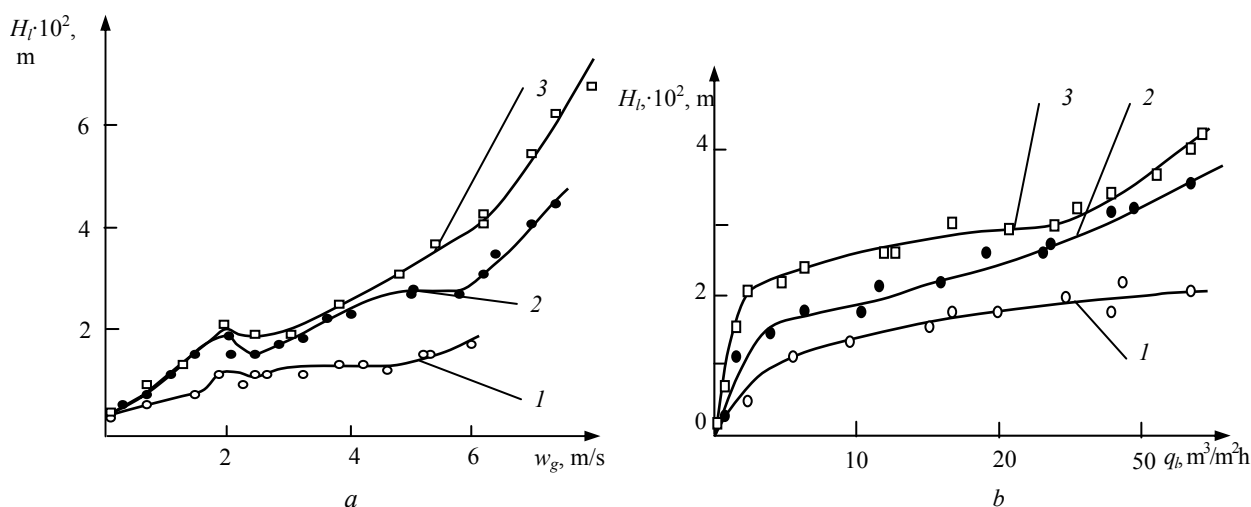


Fig. 3. Dependence of retaining ability of the movable nozzle on gas and liquid loads at $H_{dh} = 0.1$ m: 1 – $\rho_{ne} = 100$ kg/m³, 2 – $\rho_{ne} = 500$ kg/m³, 3 – $\rho_{ne} = 800$ kg/m³; a – $H_l = F(w_g)$; b – $H_l = f(q_g)$

Рис. 3. Зависимость удерживающей способности слоя подвижной насадки от нагрузок по газу и жидкости при $H_{dh} = 0,1$ м: 1 – $\rho_{ne} = 100$ кг/м³, 2 – $\rho_{ne} = 500$ кг/м³, 3 – $\rho_{ne} = 800$ кг/м³; а – $H_l = f(w_g)$; б – $H_l = f(q_g)$

For non-irrigated layers the equation is obtained:

$$\text{Re}_0 = \frac{\omega_0 d_{ne}}{v_g} = \frac{Ar_g}{130 \frac{1-\varepsilon_0}{\varepsilon_0^3} + \sqrt{\frac{Ar_g}{\varepsilon_0^3}}}, \quad (1)$$

where, in order to record the peculiarities of the compressed flow of balls with gas stream the stationary layer porosity is used. Equation (1) provides the calculation w_0 for the layer of balls with diameter of the nozzle elements $d_{ne} = 35...42$ mm and density $\rho_{en} = 90...1000$ kg/m³ for $H_{cm} > d_{ne}$. Nozzle irrigation leads to a decrease of w_g^* (w_0'), and with the increase of ρ_{ne} the w_0' value decreases. With regard to the influence of q_l and ρ_{ne} let us write down:

$$\omega_0' = \frac{4320 \cdot \rho_{ne}^{-1,21} \cdot \omega_0}{4320 \rho_{ne}^{-1,21} + q_l^{(-1,25 \cdot 10^{-4} \rho_{ne} + 0,275)}}. \quad (2)$$

This equation is fair for $200 \leq \rho_{ne} \leq 1000$ kg/m³ and $5 \leq q_l \leq 25$ m³/(m²·h). For $\rho_{ne} < 200$ kg/m³ dependence of $w_0' = F(\rho_{ne})$ appears to be bigger. The w_1 value characterizes the transition to the developed pseudo-fluidization, i. e. to the uniformly pseudo-fluidized layer:

$$\omega_1 = 1,4 \cdot \omega_0'. \quad (3)$$

The width of the area of initial pseudo-fluidization sharply increases with ρ_{ne} growth and the layers of nozzle elements (NE) with density $\rho_{ne} > 500$ kg/m³ operate in practice only in this mode.

Dynamic height is characterized by a mean value of oscillating movable nozzle (MN) level, and was determined visually. In the stationary state, these oscillations are characterized by constant amplitude:

$$H_d = H_{hd} + H_{hd} (\omega_g - \omega_0') \times \\ \times [16,2 \exp(-0,002 \rho_{ne} - 70 d_{ne}) + 0,007 q_l]. \quad (4)$$

If $w_g = w_0'$, then value $H_d = H_{dh}$. This formula provides a calculation of H_d for dry layer of MN, as well; it is fair in the range of $w_g = w_0' - 4.5$ m/s; $q_l \leq 25$ m³/(m²·h); $H_{dh} = 0.5-0.2$ m; $\rho_{ne} = 90-1000$ kg/m³, $d_{ne} = 0,035-0,042$ m.

The gas stream pressure loss value Δp determines the capacity of the electric fan motor (excluding energy consumption for separation and loss in communication).

Traditionally the ratio $\left(\frac{\Delta p}{H_{hd}}\right)$ is used, but the main MN

layer characteristic is its dynamic height H_{dh} . Complex $\left(\frac{\Delta p}{H_{hd}}\right)$ leads to a distortion of the physical scene, as,

for example, with $\rho_{ne} = 1000$ kg/m³ this value exceeds 10⁴ Pa/m. This maximum value corresponds to the weight of the fixed layer NE, where voids are completely filled with liquid. This should result in the inverted cocurrent if losses are greater than 10 Pa/m, which in practice is not observed even at $w_g > 8$ m/s. So it is worthy using the specific dynamic pressure loss, i. e. the value $\left(\frac{\Delta p}{H_d}\right)$.

It consists of a dynamic specific NE weight $\left(\frac{gM_{ne}}{F_k H_d}\right)$ and pressure loss Δp_d , that characterize the contribution to the general value of the detained fluid pressure loss and friction due to the elements mixing in the pseudo-fluidized layer:

$$\Delta p = \Delta p_d H_d + \frac{gM_{ne}}{F_k}, \\ \Delta p_d = 0,8 H_{hd}^{-0,65} \omega_g \times \\ \times \exp(1,85 \cdot 10^{-3} \rho_{ne} + 1,56 \cdot 10^{-2} q_l + 2,86), \quad (5)$$

where M_{ne} – NE layer mass.

The equation is adequate to the experimental data with an average relative error 0.11 and is fair in the ranges: $0.05 \leq H_{dh} \leq 0.2$ m; $w_0 < w_g \leq 4.5$ m/s; $5 \leq q_l \leq 25$ m³/(m²·h); $200 \leq \rho_{ne} \leq 1000$ kg/m³.

Increase of H_{dh} leads to the decrease of Δp_d , which indicates pseudo-fluidization quality deterioration. For the elements with $\rho_{ne} = 90$ kg/m³ the Δp_d value does not depend on w_g ; for $w_g = w_0'$ the smallest difference of Δp_d occurs, which was obtained for different densities ρ_{ne} . Heavier NE correspond to the greater value Δp_d , which match physical presentations. For $q_l < 5$ m³/(m²·h) the exponential nature of equation (5) is disturbed.

Conclusion. The apparatuses with a movable nozzle are a promising solution of column HMEA, which enables operation in the extreme conditions (contaminated environment, sharp fluctuations of loads), increased limit loads, high lateral uniformity of fluid (scaling task simplification), and lack of demands to the flow distribution quality. The best ranger for mass transfer processes implementation is that of ρ_{neII} ($\rho_{en} = 200-700$ kg/m³), which is distinguished by a wide working area according to w_g , acceptable values of fluid withdrawal and a relatively small dynamic layer height.

Necessary dependencies for engineering calculation were obtained, which determine the critical speed value (w_0'), the pressure loss in the working area (Δp) and the dynamic NE layer height (H_d).

It remains necessary to study the dynamics of gas-droplet flows in the system to provide for calculation of fluid distribution units, drop moisture separation, environmental emission and scattering therein, to consider the issues of the applied nature (scale factor, work in long-term inclines and tossing; the accumulation of impurities in the recirculation liquid, etc. An improved constructive design of devices with the movable nozzle shall be developed.

References

1. Veselov F. V., Novikova T. V., Khorshev A. A. [Technological updating of power system as long-term factor of control of increase in prices of the electric power]. *Teploenergetika*. 2015, No. 12, P. 3 (In Russ.).
2. Ginzburg A. S., Belova I. N., Reshetar O. A. [Impact of climatic factors on energy consumption during the heating season]. *Teploenergetika*. 2016, Vol. 63, No. 9. P. 621–627 (In Russ.).

3. Arakelyan V. B., Danko V. P., Grigoryan R. P. Influence of the external noise intensity on the kinetics of ligands binding to receptors. Influence of the external noise intensity on the kinetics of ligands binding to receptors. *Journal of Contemporary Physics*. 2017, Vol. 52, no. 1.
4. Gorin A. N., Doroshenko A. V., Danko V. P. *Teplo-masso obmennye apparati s podviznoy nasadkoy dla tradicionnich i alternativnich energeticheskikh sistem* [Heat-mass exchangers with movable nozzle for traditional and alternative energy systems. Evaporative cooling. Dehumidification and conditioning for air (theory, experiment. practice)]. Donetsk, Svit knigi Publ., 2013, 327 p.
5. Karnaukh V. V. *Intensifikacia teplo-massoobmennich processov v ventilatornykh gradirnykh plonocnogo tipa* [Intensification of heat-mass transfer processes in water cooling tower film-type]. Donetsk, DonNUET Publ., 2010, 159 p.
6. Kaiser A. S., Lucas M., Viedma A., Zamora B. Numerical model of evaporative cooling processes in a new type of cooling tower. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2005, No. 2, P. 986–999.
7. Kroshilin A. E., Kroshilin V. E. [Correct numerical simulation of a two-phase coolant]. *Teploenergetika*. 2016, Vol. 63, No. 2, P. 98–106 (In Russ.).
8. Danko V. P., Karnaukh V. V. [Experimental researches of heat transfer in a layer moving fitting striping contour solar systems]. *Vestnik Mezhdunarodnoi Akademii Kholoda*. 2016, No. 3, P. 73–77 (In Russ.).
9. Danko V. P., Kudrin A. B., Radionenko V. N. *Ispol'zovanie al'ternativnykh istochnikov energii i vtorichnykh energoresursov v holodil'noy otrasli* [Use of alternative energy sources and secondary energy resources in refrigerating branch]. Samara, Lada-Print Publ., 2015, 157 p.
10. Poddubnyi I. I., Razuvanov N. G. [Research of hydrodynamics and heat exchange at a lowering current of liquid metal in the channel of rectangular section in a coplanar magnetic field]. *Teploenergetika*. 2016, No. 2, P. 13 (In Russ.).
11. Shestova T. D., Markvart A. S., Lozovsky T. L., Zhelezny V. P. Cubical equations of state for predicting the phase equilibria of poorly studied substances. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2013, Vol. 87, No. 6, P. 883.
12. Doroshenko A. V., Vasyutinskii S. Yu., Danko V. P., Glauberma M. A. [Research of processes in the teplo-massoobmennyykh devices with a mobile nozzle for solar multipurpose systems]. *Fizika aerodispersnykh sistem*. 2012, No. 49, P. 14–26 (In Russ.).
13. Valueva E. P., Purdin M. S. [Hydrodynamics and heat exchange of the pulsing laminar stream in channels]. *Teploenergetika*. 2015, No. 9, P. 24.
14. Imre A. R., Házi G., Horváth Á., Marácz C., Mazur V., Artemenko S. The effect of low-concentration inorganic materials on the behaviour of supercritical water. *Nuclear Engineering and Design*. 2011, Vol. 241, No. 1, P. 296–300.
15. Danko V. P. [Solar collectors with a metal-polymeric absorber for systems of heatcold supply]. *Nauchnye trudy Odesskoi natsional'noi akademii pishchevykh proizvodstv*. 2014, Vol. 45, No. 1, P. 88–94.
- долгосрочный фактор сдерживания роста цен электроэнергии // Теплоэнергетика. 2015. № 12. С. 3.
2. Гинзбург А. С., Решетарь О. А., Белова И. Н. Влияние климатических факторов на энергопотребление в отопительный сезон // Теплоэнергетика. 2016. № 9. С. 20–27.
3. Arakelyan V. B., Danko V. P., Grigoryan R. P. Influence of the external noise intensity on the kinetics of ligands binding to receptors. Influence of the external noise intensity on the kinetics of ligands binding to receptors // *Journal of Contemporary Physics*, 2017. Vol. 52, № 1.
4. Горин А. Н., Дорошенко А. В., Данько В. П. Тепло массообменные аппараты с подвижной насадкой для традиционных и альтернативных энергетических систем. Испарительное охлаждение, осушение и кондиционирование воздуха: теория, эксперимент, практика. Донецк : Світ книги, 2013. 327 с.
5. Карнаух В. В. Интенсификация тепло массообменных процессов в вентиляторных градирнях пленочного типа : монография. Донецк : ДонНУЭТ, 2010. 159 с.
6. Numerical model of evaporative cooling processes in a new type of cooling tower / A. S. Kaiser [et al.] // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2005. № 2. Pp. 986–999.
7. Крошилин А. Е., Крошилин В. Е. Корректное численное моделирование двухфазного теплоносителя // Теплоэнергетика. 2016. № 2. С. 22.
8. Данько В. П., Карнаух В. В. Исследование влияния концентрации раствора абсорбента на охлаждающую способность тепло массообменных аппаратов с подвижной насадкой // Вестник Международной академии холода. 2016. № 3. С. 73–77.
9. Данько В. П., Кудрин А. Б., Радионенко В. Н. Использование альтернативных источников энергии и вторичных энергоресурсов в холодильной отрасли. Самара : Лада-принт, 2015. 157 с.
10. Поддубный И. И., Разуванов Н. Г. Исследование гидродинамики и теплообмена при опускном течении жидкого металла в канале прямоугольного сечения в компланарном магнитном поле // Теплоэнергетика. 2016. № 2. С. 13.
11. Cubical equations of state for predicting the phase equilibria of poorly studied substances / T. D. Shestova [et al.] // *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2013. Vol. 87, no. 6. p. 883.
12. Исследование процессов в тепло массообменных аппаратах с подвижной насадкой для солнечных многофункциональных систем / А. В. Дорошенко [и др.] // Физика аэродисперсных систем. 2012. № 49. С. 14–26.
13. Валуева Е. П., Пурдин М. С. Гидродинамика и теплообмен пульсирующего ламинарного потока в каналах // Теплоэнергетика. 2015. № 9. С. 24.
14. The effect of low-concentration inorganic materials on the behaviour of supercritical water / A. R. Imre [et al.] // *Nuclear Engineering and Design*. 2011. Vol. 241, no. 1. P. 296–300.
15. Данько В. П. Солнечные коллекторы с металло-полимерным абсорбером для систем теплохладоснабжения // Научные труды Одесской национальной академии пищевых производств. 2014. Вып. 45, т. 1. С. 88–94.

Библиографические ссылки

1. Веселов Ф. В., Новикова Т. В., Хоршев А. А. Технологическое обновление теплоэнергетики как

ВОЗМОЖНЫЕ ВАРИАНТЫ ПОВЫШЕНИЯ КРИПТОСТОЙКОСТИ АЛГОРИТМОВ ШИФРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ КОНСТРУКЦИИ НИБЕРГА

М. А. Дмитриев

Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
E-mail: makcmad@mail.ru

В настоящее время одним из наиболее применяемых средств обеспечения защиты информации от несанкционированного доступа являются блочные симметричные криптографические алгоритмы, как, например, рассматриваемый в данной статье алгоритм Rijndael. Стремительный рост вычислительной мощности ЭВМ и существенное развитие линейного криптоанализа делают актуальной задачу дальнейшего наращивания криптостойкости существующих алгоритмов, а также разработки новых. Важным компонентом, определяющим устойчивость блочного симметричного криптографического алгоритма к наиболее распространенным видам криптоанализа, является качество блока замен – S-блока подстановки. Цель работы – провести вычисления и получить все возможные блоки замен на основе неприводимых полиномов над полем $GF(2^8)$, а также их композиций. Для этого был разработан ряд программ, с помощью которых были получены блоки замен, обладающие различными криптографическими характеристиками. Был произведен расчет количественных оценок данных характеристик путем представления таблиц замен в виде наборов булевых функций. Особое внимание было уделено таким характеристикам, как нелинейность булевых функций, максимум модуля коэффициентов корреляции и количество нулей корреляционной матрицы блоков замен, как наиболее значимым характеристикам. Полученные блоки замен могут стать основой для дальнейшего изучения возможных вариантов повышения криптостойкости алгоритма Rijndael.

Ключевые слова: алгоритм Rijndael, S-блок, неприводимый полином над полем Галуа.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 3, P. 505–509

POSSIBLE OPTIONS TO IMPROVE CRYPTOGRAPHIC RELIABILITY OF ALGORITHMS BASED ON NYBERG CONSTRUCTION

M. A. Dmitriev

Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
E-mail: makcmad@mail.ru

Nowadays one of the most used tools to protect data from unauthorized access is block symmetric-key cryptographic algorithms. The rapid growth of computer processing power and significant development of linear cryptanalysis actualize the task to continue increasing reliability of the existing algorithms, as well as developing new ones. An important component in determining the stability of a block symmetric-key cryptographic algorithm to the most common types of cryptanalysis is the quality of S-box substitution. This work was aimed at calculating and achieving all possible S-box substitutions, based on irreducible polynomials over the Galois field and their compositions. For this purpose a set of programs to obtain S-box substitutions which have different cryptographic characteristics with its help was developed. Calculation of the quantitative values of these characteristics was performed by presenting S-box substitutions in the form of sets of Boolean functions. Particular attention was paid to such characteristics as nonlinearity of Boolean functions, the maximum modulus of the correlation coefficients and the numbers of zeros of the correlation matrix of S-box substitutions, as those are the most important characteristics. These blocks substitutions can be the basis for further study of possible options to improve Rijndael algorithm's cryptographic reliability.

Keywords: Rijndael algorithm, S-box, irreducible polynomial over the Galois field.

Введение. Применительно к формированию таблиц замен можно выделить три основных подхода в разработке алгоритмов шифрования [1].

Одним из решений является выбор таблиц замен в процессе разработки стандарта и открытое опубли-

кование полученных таблиц, одинаковых для всех пользователей данного алгоритма. Такой подход был реализован в алгоритме DES, а в 2015 году применен в алгоритме «Кузнечик», ставшем стандартом Российской Федерации с 2016 года [2].

Применяются также алгоритмы, в которых таблицы замен не определены однозначно, а выбираются каждым пользователем самостоятельно. Такой подход реализован, например, в алгоритме ГОСТ 28147–89 [3; 4], долгое время являвшемся стандартом СССР и позднее многих стран СНГ. Отметим, что при надлежащем уровне квалификации пользователь имеет возможность выбрать качественные блоки замен, притом известные только этому пользователю, что можно трактовать как дополнительное повышение стойкости шифрования.

Блочный шифр Rijndael. Наиболее характерным примером третьего подхода может служить также считающийся стойким алгоритм Rijndael [5], в котором блок замен полностью определяется заданием неприводимого полинома над полем Галуа [6]. В Rijndael использована конструкция Ниберга, представляющая собой отображение в виде мультипликативно обратных элементов поля Галуа $GF(2^k)$:

$$y = x^{-1} \bmod [f(z), p], \quad y, x \in GF(2^k), \quad (1)$$

скомбинированная вместе с аффинным преобразованием

$$b = A \cdot y + a, \quad a, b \in GF(2^k), \quad (2)$$

где $f(z) = z^8 + z^4 + z^2 + z + 1$ – неприводимый над полем $GF(2^8)$ полином; A – невырожденная матрица аффинного преобразования; a – вектор сдвига; $p = 2$ – характеристика расширенного поля Галуа; $0^{-1} \equiv 0$ – по определению; a, b, x, y – элементы расширенного поля Галуа $GF(2^k)$; рассматриваются как десятичные числа либо двоичные векторы, либо полиномы степени $k - 1$.

Количественные характеристики блоков замен. Показателями качества блока замен [7–9] наиболее часто предлагаются следующие:

- максимум из модулей элементов матрицы коэффициентов корреляции входных и выходных битов;
- количество нулей в матрице коэффициентов корреляции;
- нелинейность как расстояние до множества аффинных функций [10–13];
- алгебраическая степень нелинейности [14];
- период возврата подстановочной конструкции в исходное состояние.

На данный момент подробно исследованы нелинейные преобразования конструкции Ниберга на основе всех изоморфных и автоморфных представлений полей $GF(2^k)$ для $k \leq 8$: выписаны все неприводимые полиномы над полями, вычислены криптографические показатели качества определяемых этими полиномами S -блоков. Таким образом, полином из (1) является не единственно возможным для построения шифра. Возможность же выбора неприводимого полинома (одного из множества в определенном смысле эквивалентных) имеет практическое значение. Поэтому появилась возможность соединить плюсы подходов ГОСТа и Rijndael.

В работе [5] приведена таблица криптографических характеристик S -блоков на базе полного класса неприводимых полиномов степени 8. Данные этой таблицы свидетельствуют о разнообразии выбора полиномов для использования в блочных шифрах в соответствии с решением использования того или иного критерия.

В связи с этим представляется актуальным рассмотрение конструкции, аналогичной AES [15], однако либо с использованием композиции неприводимых полиномов, либо с использованием в разных раундах различных полиномов или их композиций, что можно считать одним из возможных вариантов повышения стойкости алгоритма, аналогичного AES.

В данной статье проведены вычисления и получены все возможные таблицы замен на основе композиции неприводимых полиномов над $GF(2^8)$. Композицией неприводимых полиномов считается последовательное выполнение двух операций SubBytes в каждом раунде. Определены пары полиномов, обеспечивающих таблицы замен с близкими к оптимальным свойствами корреляционной матрицы.

Табл. 1 представляет собой данные по криптографическим характеристикам S -блоков, полученных в результате выполнения операции SubBytes для всех возможных неприводимых полиномов над $GF(2^8)$, где сам полином записан в виде десятичных эквивалентов.

Аналогичные данные были получены для композиций неприводимых полиномов (в графе «Композиция» полиномы записаны в порядке выполнения операции SubBytes). Ввиду большого объема полученных данных в данной статье хотелось бы заострить внимание на тех композициях, корреляционная матрица которых обладает наиболее примечательными криптографическими характеристиками. Полученные данные приведены в табл. 2–4.

Таблица 1

Криптографические характеристики S -блоков неприводимых полиномов

№ п/п	Полином	Максимум модуля	Количество нулей	Степень нелинейности							
1	283	0,125	4	112	112	112	112	112	112	112	112
2	285	0,125	5	112	112	112	112	112	112	112	112
3	299	0,125	10	112	112	112	112	112	112	112	112
4	301	0,125	2	112	112	112	112	112	112	112	112
5	313	0,125	7	112	112	112	112	112	112	112	112

№ п/п	Полином	Максимум модуля	Количество нулей	Степень нелинейности							
6	319	0,109375	6	112	112	112	112	112	112	112	112
7	333	0,125	7	112	112	112	112	112	112	112	112
8	351	0,125	2	112	112	112	112	112	112	112	112
9	355	0,109375	2	112	112	112	112	112	112	112	112
10	357	0,09375	6	112	112	112	112	112	112	112	112
11	361	0,125	4	112	112	112	112	112	112	112	112
12	369	0,125	5	112	112	112	112	112	112	112	112
13	375	0,109375	2	112	112	112	112	112	112	112	112
14	379	0,125	3	112	112	112	112	112	112	112	112
15	391	0,125	5	112	112	112	112	112	112	112	112
16	395	0,125	5	112	112	112	112	112	112	112	112
17	397	0,109375	5	112	112	112	112	112	112	112	112
18	415	0,109375	3	112	112	112	112	112	112	112	112
19	419	0,109375	11	112	112	112	112	112	112	112	112
20	425	0,109375	3	112	112	112	112	112	112	112	112
21	433	0,109375	2	112	112	112	112	112	112	112	112
22	463	0,125	3	112	112	112	112	112	112	112	112
23	445	0,125	0	112	112	112	112	112	112	112	112
24	451	0,109375	3	112	112	112	112	112	112	112	112
25	471	0,125	3	112	112	112	112	112	112	112	112
26	477	0,125	4	112	112	112	112	112	112	112	112
27	487	0,125	3	112	112	112	112	112	112	112	112
28	499	0,125	7	112	112	112	112	112	112	112	112
29	501	0,109375	4	112	112	112	112	112	112	112	112
30	505	0,125	8	112	112	112	112	112	112	112	112

Таблица 2

Композиции с максимальным и минимальным значением максимума модуля корреляционной матрицы

№ п/п	Композиция	Максимум модуля	Количество нулей	Степень нелинейности							
1	301–477	0,109375	6	102	102	106	106	102	98	102	108
2	319–477	0,296875	6	102	94	106	100	104	102	104	96
3	357–433	0,109375	7	106	104	104	104	104	108	104	100
4	361–351	0,109375	4	104	106	102	102	106	106	106	102
5	369–361	0,109375	7	106	102	102	108	106	102	106	102
6	369–375	0,109375	10	104	104	108	104	104	102	104	104
7	369–395	0,109375	4	108	106	102	102	106	102	106	106
8	391–283	0,109375	3	104	104	102	104	104	104	104	104
9	391–433	0,109375	7	104	100	104	104	106	106	106	104
10	425–313	0,109375	8	104	104	104	102	106	100	106	104
11	463–357	0,109375	4	104	104	102	102	102	98	102	102
12	445–333	0,109375	13	104	104	106	106	106	102	106	100
13	451–369	0,109375	10	102	98	104	104	106	106	106	106
14	471–375	0,109375	10	100	98	104	102	106	104	106	106
15	501–425	0,109375	6	102	102	104	104	106	108	106	104

Таблица 3

Композиции с максимальным и минимальным значением нелинейности

№ п/п	Композиция	Максимум модуля	Количество нулей	Степень нелинейности							
1	283–351	0,203125	9	104	102	102	104	110	102	110	106
2	299–285	0,171875	8	110	104	102	102	104	102	104	102
3	299–445	0,140625	5	104	104	104	106	110	108	110	106
4	301–285	0,15625	9	100	98	104	106	110	106	110	104
5	301–375	0,125	7	106	106	106	106	106	110	106	102
6	319–499	0,140625	4	110	108	106	102	108	106	108	100
7	351–299	0,171875	5	106	106	110	104	106	106	106	108
8	351–357	0,140625	4	102	102	104	106	110	104	110	102
9	355–471	0,171875	5	106	104	104	110	106	104	106	106
10	361–299	0,15625	4	106	102	104	88	102	100	102	104
11	361–477	0,125	7	110	106	104	104	106	106	106	102
12	379–415	0,1875	5	108	102	110	100	104	104	104	108
13	419–471	0,1875	7	106	106	104	110	102	96	102	104
14	425–299	0,140625	6	104	108	96	104	106	110	106	106
15	433–357	0,203125	6	110	102	106	104	104	106	104	104
16	451–319	0,140625	7	102	106	104	96	104	98	104	110
17	451–451	0,203125	8	100	102	104	100	108	106	108	110
18	451–505	0,15625	4	102	106	110	104	100	98	100	98
19	487–299	0,15625	5	104	106	104	102	106	100	106	110
20	505–283	0,125	2	106	104	102	106	104	104	104	88
21	505–285	0,171875	6	102	106	108	110	108	104	108	108
22	505–301	0,171875	6	110	104	98	106	96	104	96	106
23	505–499	0,15625	2	106	108	104	102	106	104	106	110

Таблица 4

Композиции с максимальным и минимальным количеством нулевых значений корреляционной матрицы

№ п/п	Композиция	Максимум модуля	Количество нулей	Степень нелинейности							
1	283–445	0,171875	15	106	104	98	106	108	104	108	108
2	379–391	0,234375	15	98	104	98	102	96	104	96	108
3	487–361	0,203125	0	108	102	102	100	104	108	104	102

Таким образом, мы видим, что для обеспечения равномерной минимизации матрицы коэффициентов корреляции (согласно табл. 1) целесообразнее всего использовать полином для обращения элементов с минимальным количеством нулей, например, полином 445. Применение данного полинома позволит затруднить линейную аппроксимацию шифра аффинными булевыми функциями, увеличивая его сопротивляемость атакам дифференциального криптоанализа. Эти полиномы обладают лучшими (минимальными) значениями корреляции векторов выхода и входа S-блока подстановки по сравнению с полиномом, применяемым в алгоритме Rijndael, в то же время при использовании композиции полиномов (согласно табл. 4) наиболее подходящей в этом случае окажется композиция полиномов 487–361 либо композиции полиномов 285–471, 299–369, 313–395, 319–379, 351–477, 357–397, 361–313, 361–487, 391–379, 477–463 с количеством нулей корреляционной матрицы, равным одному.

Для обеспечения отсутствия корреляции векторов выхода и входа наиболее предпочтительным будет полином 419 либо композиции 283–445, 379–391 с наибольшим количеством нулей, а также 46 различ-

ных композиций, количество нулей корреляционной матрицы которых варьируется от 11 до 14. Они обладают наибольшим количеством нулей в матрицах коэффициентов корреляции входа и выхода, что затруднит корреляционный криптоанализ, однако упростит аппроксимацию шифра аффинными булевыми функциями за счет большего количества единичных значений элементов в полной матрице коэффициентов корреляции со всеми аффинными функциями.

Заключение. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что большинство композиций неприводимых полиномов над $GF(2^8)$ обладают более интересными криптографическими характеристиками в зависимости от потребностей использующего шифр как в части максимума модуля корреляционной матрицы, так и в количестве нулей корреляционной матрицы, но в то же время расстояние композиций до множества аффинных функций уменьшилось и варьируется от 88 до 110.

Множество композиций неприводимых полиномов может использоваться как более обширный источник S-блоков для шифра Rijndael. К примеру, множество композиций неприводимых полиномов, максимум модуля корреляционных матриц которых превышает

0,125 (максимальное значение максимума модуля корреляционной матрицы неприводимого полинома), насчитывает 795 штук из 900 возможных.

Дальнейшее изучение возможных вариантов повышения стойкости алгоритма Rijndael будет основываться на полученных характеристиках блоков замен, а также включать в себя оценку криптостойкости алгоритма в случае применения полученных результатов, а именно, использование различных полиномов или их композиций в различных раундах.

Библиографические ссылки

1. Mister S., Adams C. Practical S-box design // *Proceedings, Workshop in selected areas of cryptography. SAC'96*. 1996. 78–81 с.

2. Бабенко Л. К. Современные алгоритмы блочного шифрования и методы их анализа. М. : Гелиос АРВ, 2006. 376 с.

3. Мазурков М. И. Алгебраические свойства криптографических таблиц замен шифра Rijndael и шифра ГОСТ 28147–89 // *Труды СИЭТ*. 2012. С. 149–151.

4. Медведева Т. Е. Оценка криптостойкости таблиц замен алгоритма ГОСТ 28147–89 // *Решетневские чтения : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Красноярск, 2012*. С. 666.

5. Мазурков М. И., Соколов А. В. Криптографические свойства нелинейного преобразования шифра Rijndael на базе полных классов неприводимых полиномов // *Праці Одеського політехнічного університету*. 2012. № 2. 183–189 с.

6. Лидл Р., Нидеррайтер Г. Конечные поля. М. : Мир, 1988. 667 с.

7. Жданов О. Н. Методика выбора ключевой информации для алгоритма блочного шифрования. М. : Инфра-М. 2013. 19–34 с.

8. Nyberg K. Differentially uniform mappings for cryptography. I *Advances in cryptology // Proc. of EUROCRYPT'93*. 1994. Vol. 765. P. 55–65.

9. Жданов О. Н., Золотарев В. В. Методы и средства криптографической защиты информации / СибГАУ. Красноярск, 2008. 253 с.

10. Логачев О. А., Сальников А. А., Ященко В. В. Булевы функции в теории кодирования и криптологии. М. : МЦНМО, 2004. 470 с.

11. Васькевич А. В., Жданов О. Н. Нахождение нелинейности булевой функции с помощью преобразования Уолша // *Решетневские чтения : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Красноярск, 2012*. 655–700 с.

12. Никитин Д. А., Дьяконов К. В. О распределении значений нелинейности булевых функций // *Актуальные проблемы безопасности информационных технологий : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. / СибГАУ. Красноярск, 2010*. 15–22 с.

13. Жуков А. Е. Нелинейность булевых функций : пособие по курсу «Криптографические методы защиты информации». М. : МГТУ им. Баумана, 2002. 45–112 с.

14. Fuller J., Millan. W. Linear Redundancy in S-Boxes // *Fast Software Encryption : 10th International Workshop*. 2003. Vol. 2887. P. 74–86.

15. Daemen J., Rijmen V. The Design of Rijndael. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002. 31–51 с.

References

1. Mister S., Adams C. Practical S-box design. *Proceedings, Workshop in selected areas of cryptography. SAC'96*. 1996, P. 78–81.

2. Babenko L. K. *Sovremennye algoritmy blochnogo shifrovaniya i metody ikh analiza* [Current block encryption algorithms and methods of their analysis]. Moscow, Gelios ARV Publ., 2006, 376 p.

3. Mazurkov M. I. [Algebraic properties of cryptographic substitution tables of Rijndael and GOST 28147–89 cipher]. *Trudy SIET*. 2012, P. 149–151 (In Russ.).

4. Medvedeva T. E. [Evaluation of the reliability of GOST 28147–89 algorithm's substitution tables]. *Reshetnevskie chteniya* [Reshetnev readings]. 2012, P. 666 (In Russ.).

5. Mazurkov M. I., Sokolov A. V. [Cryptographic properties of nonlinear transform of Rijndael cipher based on complete classes of irreducible polynomials], *Pratsi Odes'kogo politekhnichnogo universitetu*. 2012, No. 2, P. 183–189 (In Russ.).

6. Lidl R., Niederreiter G. *Konechnye polya* [Finite fields]. Moscow, Mir Publ., 1988, 667 p.

7. Zhdanov O. N. *Metodika vybora klyuchевой informatsii dlya algoritma blochnogo shifrovaniya* [Key information selection for the block cipher algorithm]. Moscow, INFRA-M Publ., 2013, P. 19–34.

8. Nyberg, K. Differentially uniform mappings for cryptography. *Advances in cryptology. Proc. of EUROCRYPT'93. Lecture Notes in Computer Science*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1994, Vol. 765, P. 55–65.

9. Zhdanov O. N., Zolotarev V. V. *Metody i sredstva kriptograficheskoy zashchity informatsii* [Methods and means of cryptographic protection of information]. Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2008, 253 p.

10. Logachev O. A., Sal'nikov A. A., Yashchenko V. V. *Bulevy funktsii v teorii kodirovaniya i kriptologii* [Boolean functions in coding theory and cryptology]. Moscow, MTsNMO Publ., 2004, 470 p.

11. Vashkevich A. V., Zhdanov O. N. [Finding nonlinearity of a Boolean function by Walsh converting]. *Reshetnevskie chteniya* [Reshetnev readings]. Krasnoyarsk, 2012, P. 655–700 (In Russ.).

12. Nikitin D. A., D'yakonov K. V. [On the distribution of the values of the nonlinearity of Boolean functions]. *Actual Problems of Information Technology Security: Materials of IV International scientific-practical conference* [Actual problems of information technology security: materials of the IV International Scientific and Practical Conference]. Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2010, P. 15–22 (In Russ.).

13. Zhukov A. E. *Nelineynost' bulevykh funktsiy* [Nonlinearity of Boolean functions]. Moscow, MGTU im. Bauman Publ., 2002, P. 45–112.

14. Fuller J. Millan. W. Linear Redundancy in S-Boxes. *Fast Software Encryption, 10th International Workshop*. Sweden, Lund, 2003. Vol. 2887. P. 74–86.

15. Daemen J., Rijmen V. The Design of Rijndael. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Springer. 2002, P. 31–51.

NON-PARAMETRIC ALGORITHMS OF RECONSTRUCTION OF MUTUALLY AMBIGUOUS FUNCTIONS FROM OBSERVATIONS

A. A. Korneeva, S. S. Chernova*, A. V. Shishkina

Siberian Federal University, Institute of space and information technologies
26b, Academica Kirenskogo Str., 660074, Russian Federation

*E-mail: chsvetlanas@gmail.com

We consider the task of reconstruction of the regression function from observations with errors. Under parametric uncertainty conditions this problem is solved in the following sequence: first the type of regression function with accuracy to parameters is set, then the next stage is the estimation of these parameters based on training sample elements. The main problem that arises is choosing a parametric structure, i. e. the choice of parameters with an accuracy to the vector of parameters. At the same time more or less inaccuracy can be allowed, descriptions of many variables functions with accuracy to parameters cause particular difficulties. Another known way of solving such problems, which is the nonparametric estimation of regression function from observations, in this case the stage of choosing a parametric equation of the regression function is missing. A number of publications is devoted to this area including monographs where the results are in most cases related to the asymptotic properties of the regression function.

The article considers the task of reconstruction of mutually ambiguous functions of many arguments from observations with random errors in the conditions of nonparametric uncertainty. This problem has been insufficiently studied, although it has a significant importance in the identification and control of objects of a Wiener and Hammerstein class. The control theory widely uses already known mutually ambiguous specifications that describe the work of items with a loop of hysteresis, backlashes and others. Some modifications of nonparametric estimates of mutually ambiguous features including multidimensional are given. A series of computing experiments have been conducted where for simplicity reasons the simplest mutually ambiguous curves were taken, parametric structure of these curves for the algorithms was unknown, only observation was known. Numerical studies covered two cases: different sample sizes and various disturbances affecting the studied processes. The reconstruction of mutually ambiguous dependency plays an important role in the development of robots and various robotic systems moving on in an undefined or unknown terrain. As separate blocks the considered algorithms can be useful in devices that are used in the aerospace industry.

Keywords: aprior information, nonparametric model, mutually ambiguous characteristics, nonparametric estimates.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 3. С. 510–519

НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВЗАИМНО НЕОДНОЗНАЧНЫХ ФУНКЦИЙ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ

А. А. Корнеева, С. С. Чернова*, А. В. Шишкина

Сибирский федеральный университет, институт космических и информационных технологий
Российская Федерация, 660074, ул. Академика Киренского, 26б

*E-mail: chsvetlanas@gmail.com

Рассматривается задача восстановления функции регрессии по наблюдениям с ошибками. В условиях параметрической неопределенности эта задача решается в следующей последовательности: сначала задается вид функции регрессии с точностью до параметров, на следующем этапе осуществляется оценка этих параметров на основе элементов обучающей выборки. Основная проблема, которая здесь возникает, состоит в выборе параметрической структуры, т. е. в выборе параметров с точностью до вектора параметров. При этом может быть допущена большая или меньшая неточность, описание функций многих переменных с точностью до параметров вызывает определенные трудности. Известен другой путь решения подобной задачи, который состоит в непараметрическом оценивании функции регрессии по наблюдениям, в этом случае этап выбора параметрического уравнения функции регрессии отсутствует. Этому направлению посвящено большое количество публикаций, включая монографии, где в большинстве случаев излагаются результаты, связанные с асимптотическими свойствами непараметрических оценок функции регрессии.

Рассматривается задача восстановления взаимно неоднозначной функции многих аргументов по наблюдениям со случайными ошибками в условиях непараметрической неопределенности. Данная задача исследована недостаточно, хотя и имеет существенное значение при идентификации и управлении объектами класса Винера и Гаммерштейна. Теория управления широко использует уже известные взаимно неоднозначные

характеристики, которые описывают работу элементов с петлей гистерезиса, люфтов и др. Приведены некоторые модификации непараметрических оценок взаимно неоднозначных функций, в том числе многомерных. Также проведена серия вычислительных экспериментов, в которых из соображения простоты были взяты наиболее простые взаимно неоднозначные кривые, параметрическая структура этих кривых для алгоритмов была неизвестна, а известно только наблюдение. Численные исследования охватывали два случая: различные объемы выборки и различные уровни помех, действующих на исследуемые процессы. Восстановление взаимно неоднозначной зависимости играет важную роль при разработке роботов и различных робототехнических систем, движущихся по заранее не определенному или неизвестному рельефу. В качестве отдельных блоков рассматриваемые алгоритмы могут быть полезны в устройствах, используемых в аэрокосмической отрасли.

Ключевые слова: априорная информация, непараметрическая модель, взаимно неоднозначные характеристики, непараметрические оценки.

Introduction. The problem of function reconstruction from observations when the studied process is described by mutually ambiguous characteristics is considered. This task comes to a problem of approximation, the main feature of which is the lack of aprior information about a parametrical structure of the studied process model. Nonparametric estimation of mutually ambiguous characteristics, some modification and results of numerical studies are offered.

At reconstruction of regression functions from observations nonparametric estimates are often used. At the same time it is supposed that the nature of its dependence is unambiguous on an argument. Hereafter, the problem of function reconstruction from observations at mutually ambiguous dependence is considered. This demanded the introduction of some changes into the known estimation of Nadaraya-Watson [1].

Aprior information. Aprior information – a set of known in advance data of the studied process, criteria of optimality and restrictions. The criterion of optimality expresses those requirements which have to be best satisfied and restrictions define our opportunities. Thus, the aprior information known to the researcher at an initial stage is a basis for a mathematical formulation of the task [2]. And in essence substantially predetermines a research method [3].

In various computer systems of modelling an important role belongs to reconstruction of functions from observations, in particular to mutually ambiguous function which can be applied at creation of, for example, robots, robotic systems moving on an unknown area (the area with an unknown terrain).

The levels of aprior information are important during the modelling and control of discrete continuous processes. The processes proceeding continuously in time but the variables of which are controlled at discrete time points are related to such processes. Let us point out the following levels of aprior information [4]:

1. Systems with full information. In this case an operator of the process is exactly known, and the casual disturbances affecting an object and connection channels are absent. During the solution of identification and control problems, the methods of mathematical theory of optimum processes and also other methods of synthesis and analysis of control systems can be used.

2. Systems with incomplete information. These are systems with independent (passive) accumulation of information. In this case, the effect of input influence is perceived as simply random influence. Disturbances are usually assumed in the theory of stochastic systems as

random impact on an object. Besides, the class of operators is not known exactly but the assumptions of density of distribution of all random factors are necessary. The density of probability of random factors affecting an object and in channels of variables measurement are usually assumed normal and additive. It is clear that in this case the existence of selection of input and output variables of an object is necessary and observations are statistically independent. Systems with incomplete information are related to the class of open or neutral systems.

3. Systems with active accumulation of information. The characteristic of these systems is that problems of identification and the task of control can be integrated because sample units of measurements consistently come to the training model and a control system. Thus in case of association of these tasks, the elaboration of control impacts has ambivalent (dual) character – they have to be both exploring and controlling [2; 3]. However if the disturbances operating the process are additive in channels of measurement as well, then in general the system of dual control can become open, its rate of information accumulation does not depend on values of input variables. Such systems are called leading to open or neutral. But there exists a class of non-neutral systems, i. e. a class of irreducible systems.

4. Systems with parametric indeterminacy. A parametric level of aprior information assumes the existence of a model parametrical structure and some characteristics of random disturbances, such as zero mathematical expectation and limited dispersion which are usual. For estimation of parameters various iterative probabilistic procedures are used more often. Under these conditions the problem of identification in narrow sense, as well as in all previous cases, is also solved.

5. Systems with nonparametric uncertainty. A nonparametric level of aprior information does not assume the existence of a model but demands the existence of some data of qualitative character about the process, for example, unambiguity or ambiguity of its characteristics, linearity (for dynamic processes) or the nature of its nonlinearity. Methods of nonparametric statistics are applied to the problem of identification at this level of aprior information solving (identification in a broad sense [5]).

6. Systems with parametric and nonparametric uncertainty. From the point of view of practice, the tasks of identification of multivariable systems under conditions when the volume of initial information does not correspond to any of the above described levels are important. For example, for separate characteristics of a multivariable

process on the basis of physical-chemical and energy regularities, a law of conservation of mass, balance ratios parametrical regularities can be deduced, but for others can not be deduced. Thus, we are in the situation when the task of identification is formulated under conditions of both parametric and nonparametric aprior information. Then models represent the interdependent system of parametric and nonparametric ratios.

Nonparametric approach. Nonparametric estimates of probability density of $p(x)$ from observations $x_i, i = \overline{1, s}$ are the basis of this approach. Nonparametric estimates of multidimensional probability density were considered in [1; 6] in details and are given as:

$$P_s(x) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \frac{1}{c_s} \prod_{j=1}^k \Phi\left(\frac{x^j - x_i^j}{c_s}\right), \quad (1)$$

where $P_s(x)$ – estimation of density of elements distribution; s – sample size; k – a vector length x .

Here $\Phi(v)$ – a kernel – the finite bell-shaped function integrating with a square which satisfies the conditions [1; 4; 6]:

$$0 < \Phi(v) < \infty \quad \forall v \in \cap(v), \quad \frac{1}{c_s} \int \Phi\left(\frac{x - x_i}{c_s}\right) dx = 1,$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{c_s} \Phi\left(\frac{x - x_i}{c_s}\right) = \delta(x - x_i), \quad (2)$$

where c_s – a blurring parameter defining the size of the carrier and “delta-shape” of a kernel $\Phi(v)$ [4].

In a computing experiment the bell-shaped functions $\Phi(v)$ of different types are used, for example:

$$\begin{aligned} \text{Rectangular kernel: } \Phi(v) &= \begin{cases} 0.5, & |v| \leq 1, \\ 0, & |v| > 1. \end{cases} \\ \text{Triangular kernel: } \Phi(v) &= \begin{cases} 1 - |v|, & |v| \leq 1, \\ 0, & |v| > 1. \end{cases} \\ \text{Parabolic kernel: } \Phi(v) &= \begin{cases} 0.75(1 - v)^2, & |v| \leq 1, \\ 0, & |v| > 1. \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

In fig. 1, 2 function $\Phi(x/c_s)/c_s$ constructed for three values of a blurring parameter $c_s = 0.2, 0.4, 0.6$. is presented.

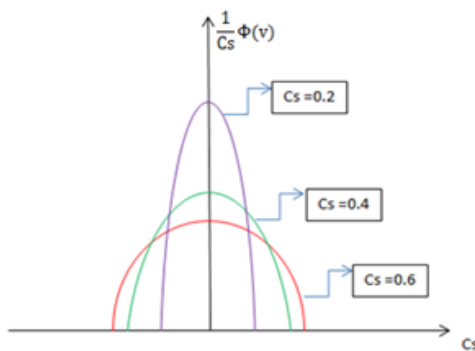


Fig. 1. Parabolic kernel

Рис. 1. Параболическое ядро

The blurring parameter c_s meets the following conditions:

$$c_s > 0, \quad \lim_{s \rightarrow \infty} s(c_s)^k = \infty, \quad \lim_{s \rightarrow \infty} c_s = 0. \quad (4)$$

Nonparametric estimation of regression function from observations. For reconstruction of function of regression of $M\{y|x\}$ from observations $\{x_i, y_i, i = \overline{1, s}\}$ we use nonparametric estimates of density of probability (1). As, $M\{y|x\}$ looks as follows:

$$M\{y|x\} = \frac{\int y p(x, y) dy}{\int p(x, y) dy}. \quad (5)$$

Replacing in (5) $p(x, y)$ by nonparametric estimates (1) and using property:

$$\frac{1}{c_s} \int_{\Omega(y)} y \Phi\left(\frac{y - y_i}{c_s}\right) dy = y_i, \quad i = \overline{1, s}, \quad (6)$$

it is easy to receive nonparametric estimation of function of Nadaraya–Watson regression which for a one-dimensional case looks as follows:

$$Y_s(x) = \frac{\sum_{i=1}^s y_i \Phi\left(\frac{x - x_i}{c_s}\right)}{\sum_{i=1}^s \Phi\left(\frac{x - x_i}{c_s}\right)}, \quad (7)$$

and for a case if x a k -dimensional vector it is equal:

$$Y_s(x) = \frac{\sum_{i=1}^s y_i \prod_{j=1}^k \Phi\left(\frac{x_j - x_i^j}{c_s}\right)}{\sum_{i=1}^s \prod_{j=1}^k \Phi\left(\frac{x_j - x_i^j}{c_s}\right)}, \quad (8)$$

where $x_i, y_i, i = \overline{1, s}$ sample of observations; $\Phi(v)$ – a bell-shaped function; v – unspecified variable; c_s – a blurring parameter.

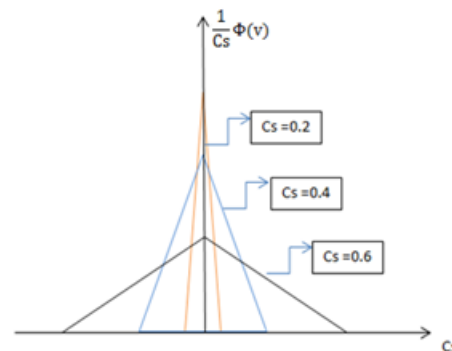


Fig. 2. Triangular kernel

Рис. 2. Треугольное ядро

At reconstruction of mutually ambiguous function of regression Nadaraya-Watson's estimation has to be changed as follows [7; 8]:

$$Y_s(x_t) = \frac{\sum_{i=1}^s y_i \Phi\left(\frac{x_t - x_i}{c_s}\right) \Phi\left(\frac{x_{t-1} - x_{i-1}}{c_s}\right) \Phi\left(\frac{y_{t-1} - y_{i-1}}{c_s}\right)}{\sum_{i=1}^s \Phi\left(\frac{x_t - x_i}{c_s}\right) \Phi\left(\frac{x_{t-1} - x_{i-1}}{c_s}\right) \Phi\left(\frac{y_{t-1} - y_{i-1}}{c_s}\right)}, \quad (9)$$

where x_{t-1} , y_{t-1} values of coordinates of regression function on the previous step of its estimation.

As numerous computing experiments showed it is worthwhile (7) to correct a bit as follows:

$$Y_s(x_t) = \frac{\sum_{i=1}^s y_i \Phi\left(\frac{x_t - x_i}{c_s}\right) \Phi^0\left(\frac{x_{t-1} - x_{i-1}}{c_s}\right) \Phi^0\left(\frac{y_{t-1} - y_{i-1}}{c_s}\right)}{\sum_{i=1}^s \Phi\left(\frac{x_t - x_i}{c_s}\right) \Phi^0\left(\frac{x_{t-1} - x_{i-1}}{c_s}\right) \Phi^0\left(\frac{y_{t-1} - y_{i-1}}{c_s}\right)}, \quad (10)$$

where $\Phi^0(v)$ with an accuracy to coefficient repeats $\Phi(v)$, and $\Phi^0(v) = 1$, if $v < 1$ and 0 in other cases. In this case $\Phi^0(v)$ will not affect a reconstruction error but will allow "to record" an algorithm in the previous point of the movement at estimation of every subsequent point. If $\mathbf{x}$ vector of dimension of k : $(x_1, \dots, x_k) \in R^k$, the training sample in this case is: $x_{li}, \dots, x_{ki}, y_i, i = \overline{1, s}$. At reconstruction of mutually ambiguous function of regression non-parametric estimation has to be changed as follows:

$$Y_s(x_t) = \frac{\sum_{i=1}^s y_i \prod_{j=1}^k \Phi\left(\frac{x_t^j - x_i^j}{c_s}\right) \prod_{j=1}^k \Phi\left(\frac{x_{t-1}^j - x_{i-1}^j}{c_s}\right) \Phi\left(\frac{y_{t-1} - y_{i-1}}{c_s}\right)}{\sum_{i=1}^s \prod_{j=1}^k \Phi\left(\frac{x_t^j - x_i^j}{c_s}\right) \prod_{j=1}^k \Phi\left(\frac{x_{t-1}^j - x_{i-1}^j}{c_s}\right) \Phi\left(\frac{y_{t-1} - y_{i-1}}{c_s}\right)}, \quad (11)$$

where x_{t-1}^j, y_{t-1}^j values of coordinates of regression function on the previous step of its estimation.

Nonparametric estimation (11) can be modified as follows:

$$Y_s(x_t) = \frac{\sum_{i=1}^s y_i \prod_{j=1}^k \Phi^0\left(\frac{x_t^j - x_i^j}{c_s}\right) \prod_{j=1}^k \Phi^0\left(\frac{x_{t-1}^j - x_{i-1}^j}{c_s}\right) \times \Phi^0\left(\frac{y_{t-1} - y_{i-1}}{c_s}\right)}{\sum_{i=1}^s \prod_{j=1}^k \Phi^0\left(\frac{x_t^j - x_i^j}{c_s}\right) \prod_{j=1}^k \Phi^0\left(\frac{x_{t-1}^j - x_{i-1}^j}{c_s}\right) \times \Phi^0\left(\frac{y_{t-1} - y_{i-1}}{c_s}\right)}, \quad (12)$$

where $\Phi^0(v)$ is same as above.

A computing experiment. First, we will consider some ideas of the control theory. The key feature is that the existing theory of control needs to present the object equation with an accuracy to a vector [9–11]. Proceeding from it, regulators can be synthesized: adaptive, self-adjusting and others [12; 13]. At application of the optimum theory of control [2; 14; 15] getting the regulators

corresponding the given control task is possible. Blocks with the basic purpose of reconstruction of mutually ambiguous characteristics according to the experimental data can occur to be a constituent of the received control systems. We give the results of some computing experiment for a similar element of system below, exactly, the reconstruction of mutually ambiguous characteristics from observations. When carrying out a computing experiment mutually ambiguous characteristics can have various shapes: circles, ellipses and others. Without violation of generality, we will accept mutually ambiguous characteristic of dependence $y(x)$ (for simplicity reasons) in the shape of a circle:

$$x^2 + y^2 = r^2, \quad (13)$$

where r – a circle radius.

In this case the training sample was formed in the following way: the initial point x' was set on a random basis and $y'(x)$ was calculated according to (13). As a result, the sample $x_i, y_i, i = \overline{1, s}$ was formed. Note that x_i could be defined as a result of a stable step Δx on $x \in \Omega(x)$ or of a random number detector $x_i \in \Omega(x), i = \overline{1, s}$. During the process of computer research other mutually ambiguous characteristics of dependence $y(x)$ were also used.

At reconstruction of mutually ambiguous characteristic from observations unknown to the researcher, the question of the choice of the direction of movement is important, though, in principle, it can be arbitrary at an initial stage. But all subsequent changes of the current variable x are in rigorous dependence of the previous one.

The processes characterized by mutually ambiguous dependences have such feature that values $x_t, t = 1, 2, \dots$ appear strictly sequentially in this or that direction. In fig. 3 such process is presented. Let, for example, on the first step of $x = x_1$, then x_2 etc. Values x_t appear only after x_{t-1} , that is "movement" x_t in the arbitrary direction takes place. Emergence of values begins at some point of x_t and moves sequentially, passing points t_2, t_3 . At the same time transition of x_1 , for example, to x_5 is impossible until the previous four points are passed. Thus, the entity of the offered estimates (9), (10), is that at estimation of the next point, "fixing" to the previous point in the corresponding algorithms takes place (9), (10).

In fig. 3 the process representing a circle is given. The movement along a variable happens from right to left and from left to right, what characterizes serial emergence of sample values.

On the following step random impact of h from observations y_i was added

$$h_t = h y_i \xi, \quad (14)$$

where $\xi \in [-1, 1]$, disturbances level $l = 0, 5, 10$ %.

As a criterion of accuracy of nonparametric estimation the ratio was used:

$$w = \frac{\sum_{i=1}^s |y_i - y_s(x_i)|}{\sum_{i=1}^s |y_i - \bar{y}|}, \quad (15)$$

where $\bar{y} = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s y_i$ – arithmetic mean; $y_s(x_i)$ – nonparametric estimation; y_i – true sample received according to a formula (13).

We will give the results of a numerical research illustrating effectiveness of an algorithm. As a bell-shaped finite function the triangular kernel was used. The algorithm was tested on the training samples of various sizes, at the same time serial increase in a sample size was performed by addition of new elements to already available: $s = 50, 100, 500$.

In all drawings we designate figure (1) – the training sample, (2) – nonparametric estimation.

The operation of an algorithm (9) in fig. 4–6 under various conditions is shown: when the sample size

is equal to 50, 100, 500 elements; the disturbances level is equal to 0 %; the experiment was conducted in the mode of the sliding examination.

In fig. 7 the dependence of an error values of reconstruction of size at various disturbance levels is presented.

In computing experiments other mutually ambiguous characteristics were also used. Some fragments of a research are given below. In fig. 8, 9 the experiment under various conditions was conducted: the sample size is equal to 100, 200 elements; the disturbance level is equal to 0 %; the experiment was made in the mode of the sliding examination.

In fig. 10–15 it is well visible how the error of reconstruction depends on a disturbance level and on a sample size for a circle and for amore composite figure.

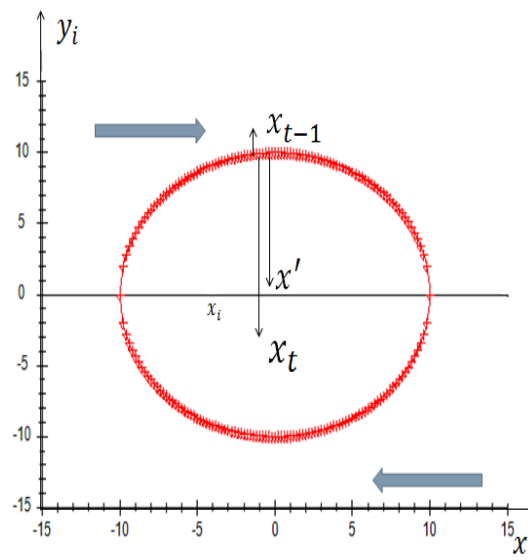


Fig. 3. This sample is presented

Рис. 3. Представлена данная выборка

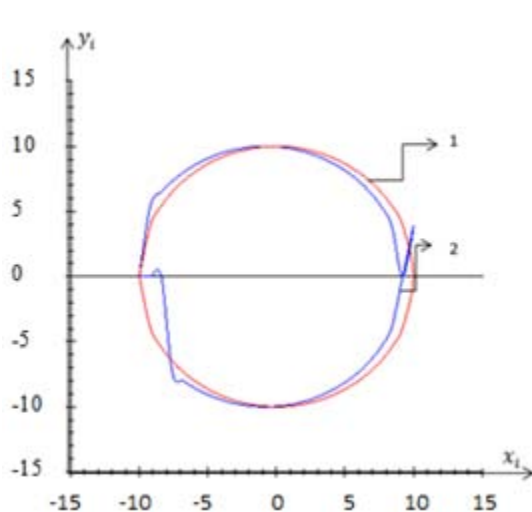


Fig. 4. $S = 50$; $w = 0.1098$

Рис. 4. $S = 50$; $w = 0,1098$

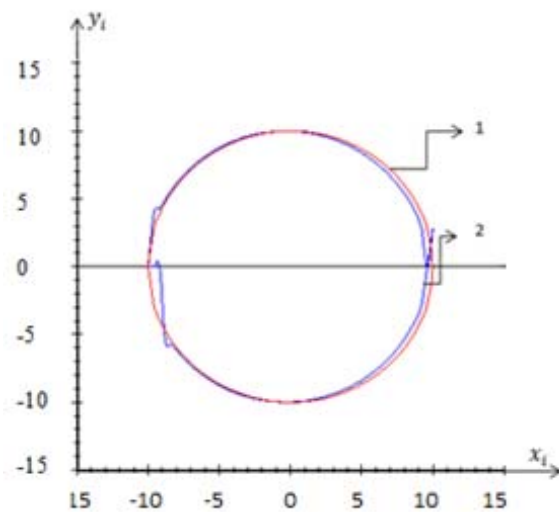


Fig. 5. $S = 100$; $w = 0.0469$

Рис. 5. $S = 100$; $w = 0,0469$

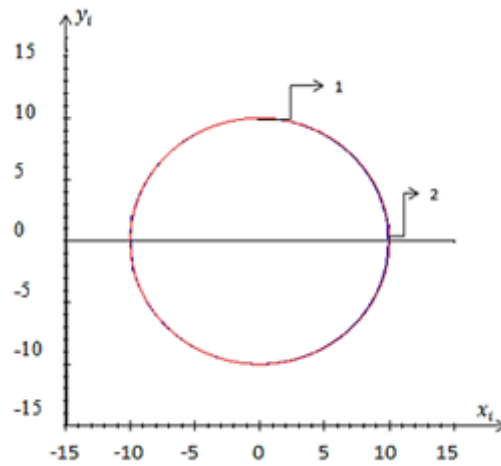


Fig. 6. $S = 500$; $w = 0.0068$

Рис. 6. $S = 500$; $w = 0,0068$

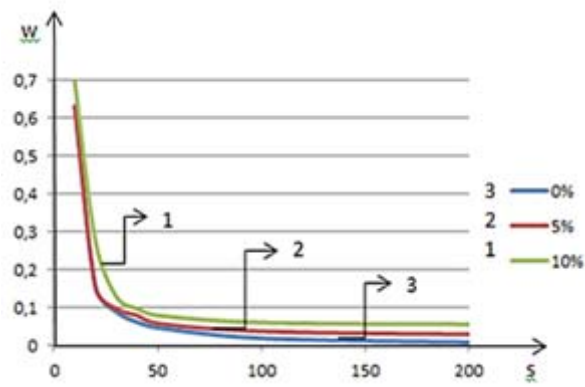


Fig. 7. Dependence of the recovery errors on the volume at different levels of interference

Рис. 7. Зависимость значений ошибки восстановления от объема при различных уровнях помех

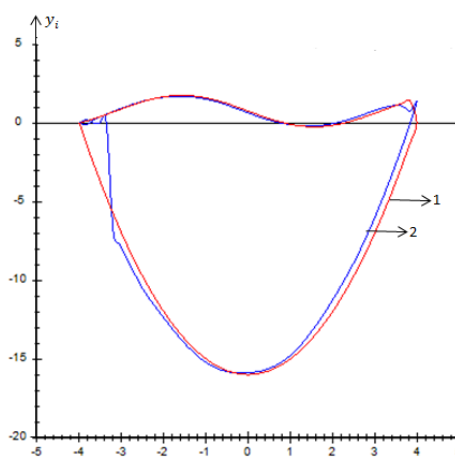


Fig. 8. $S = 100$; $w = 0.042$

Рис. 8. $S = 100$; $w = 0,042$

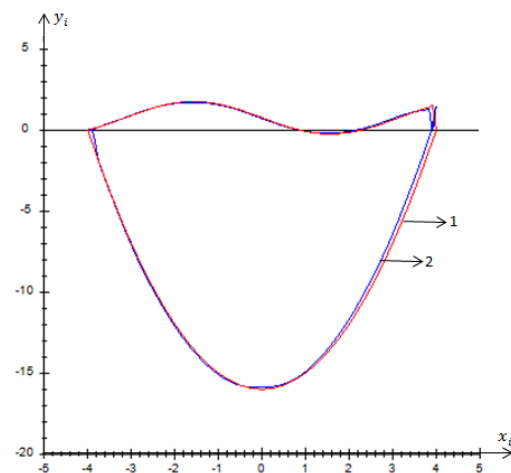


Fig. 9. $S = 200$; $w = 0.018$

Рис. 9. $S = 200$; $w = 0,018$

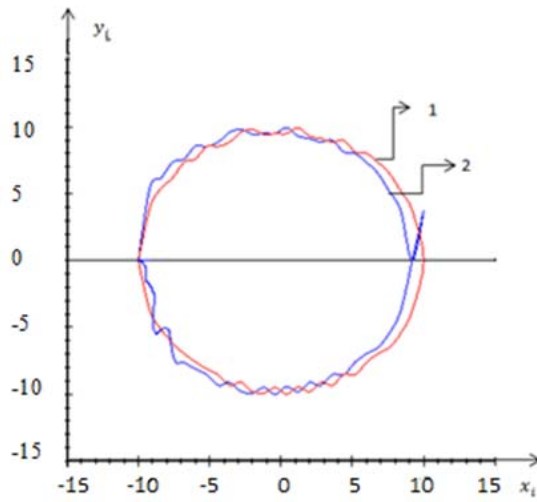


Fig. 10. $S = 50$; $l = 5\%$; $w = 0.2173$

Рис. 10. $S = 50$; $l = 5\%$; $w = 0,2173$

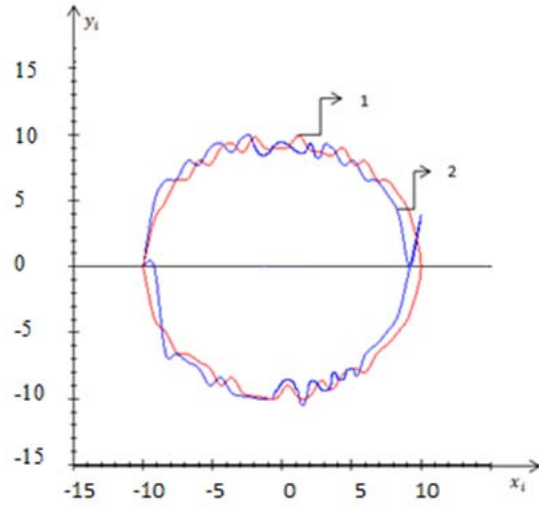


Fig. 11. $S = 50$; $l = 10\%$; $w = 0.2926$

Рис. 11. $S = 50$; $l = 10\%$; $w = 0,2926$

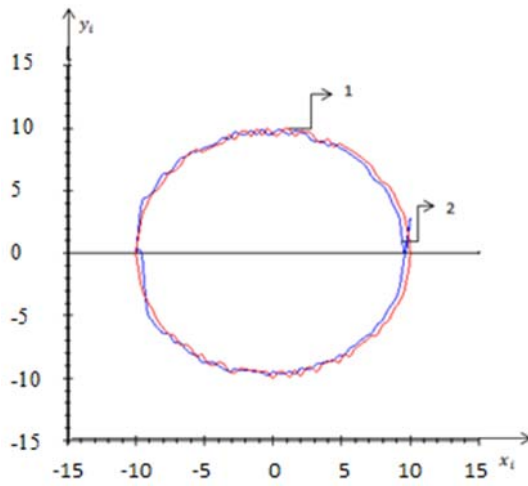


Fig. 12. $S = 100$; $l = 5\%$; $w = 0.0602$

Рис. 12. $S = 100$; $l = 5\%$; $w = 0,0602$

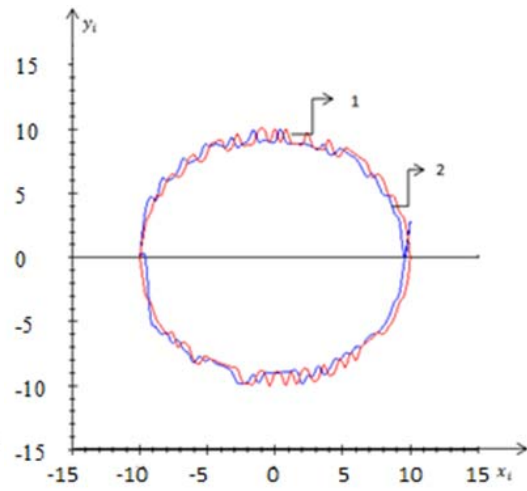


Fig. 13. $S = 100$; $l = 10\%$; $w = 0.0845$

Рис. 13. $S = 100$; $l = 10\%$; $w = 0,0845$

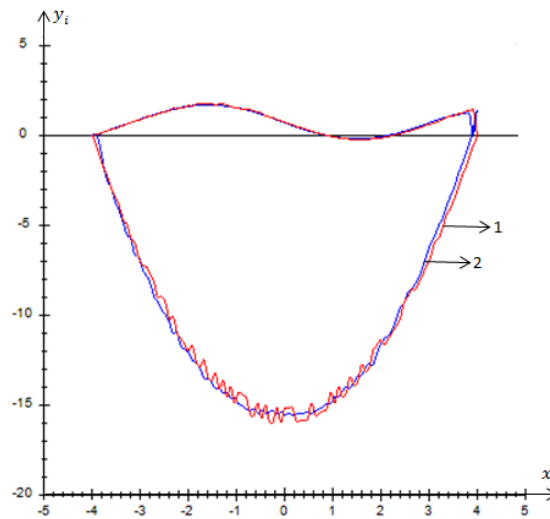


Fig. 14. $S = 200$; $l = 5\%$; $w = 0.0308$

Рис. 14. $S = 200$; $l = 5\%$; $w = 0,0308$

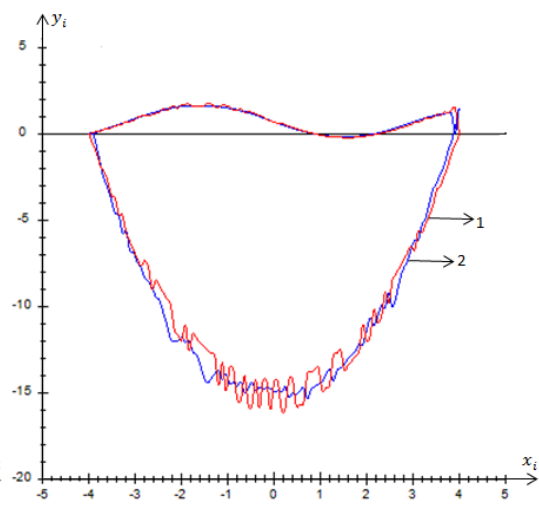


Fig. 15. $S = 200$; $l = 10\%$; $w = 0.0011$

Рис. 15. $S = 200$; $l = 10\%$; $w = 0,0011$

For descriptive reasons, we will change places of y_i and x_i in estimation (9) in fig. 16, 17. We will be convinced that estimation differs a bit at points of intersection of the graph and an abscissa axis as could seem from fig. 10–13.

We will demonstrate the work modified algorithm (10), under the following conditions: at a disturbance level equal to 5 and 10 %; with a sample size equal to 100 elements; in the mode of the sliding examination. Comparing errors of reconstruction we look at fig. 12, 13 and 18, 19 and we see a small improvement.

In fig. 18, 19 we see that an error of reconstruction is a little less than in fig. 12, 13. This means that nonparametric estimation has become more accurate.

Also in a case with a more composite function in fig. 20, 21 it is visible that an error of reconstruction is a little less than in fig. 14, 15. This means that nonparametric estimation has become more accurate.

It should be noted that: with decrease of an error reconstruction (w) the accuracy of estimation increases; with the increase of a sample size (s) the error of reconstruction (w) decreases; the size of an error grows at increase of a disturbance level (l).

The following question is possible: “Why was the circle used to check the work of an algorithm?”, because there are a lot of more composite shapes, and the answer is simple – the characteristic of this algorithm is its universality. This means that it is not essential for an algorithm what function to reconstruct, whether it is a circle, an ellipse, an Archimedes spiral or a Cassini’s oval. “Being fixed” in the previous x_i point, that is in a x_{i-1} point, and following the sense of a rotation, it is always possible to get a nonparametric estimation of mutually ambiguous functions.

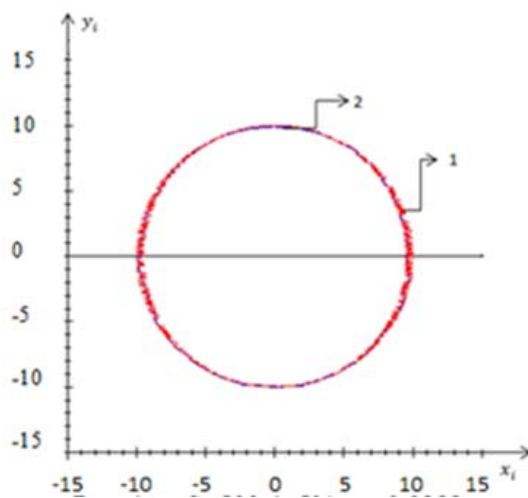


Fig. 16. $S = 500$; $l = 5 \%$; $w = 0.0283$

Рис. 16. $S = 500$; $l = 5 \%$; $w = 0,0283$

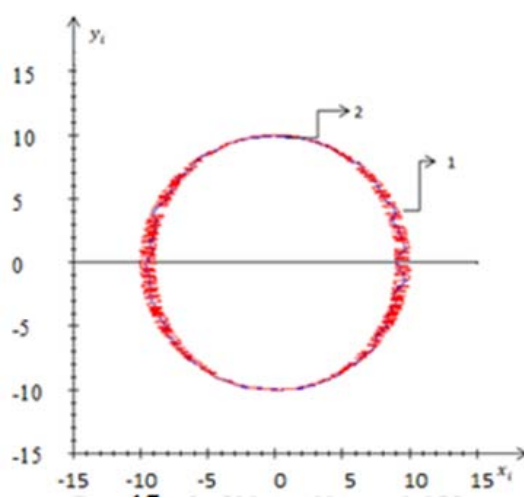


Fig. 17. $S = 500$; $l = 10 \%$; $w = 0.055$

Рис. 17. $S = 500$; $l = 10 \%$; $w = 0,055$

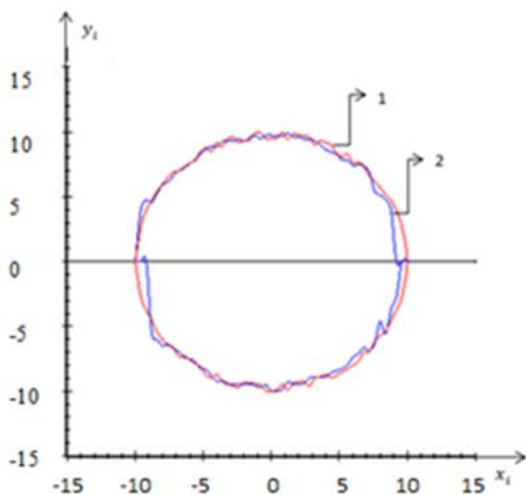


Fig. 18. $S = 100$; $l = 5 \%$; $w = 0.057$

Рис. 18. $S = 100$; $l = 5 \%$; $w = 0,057$

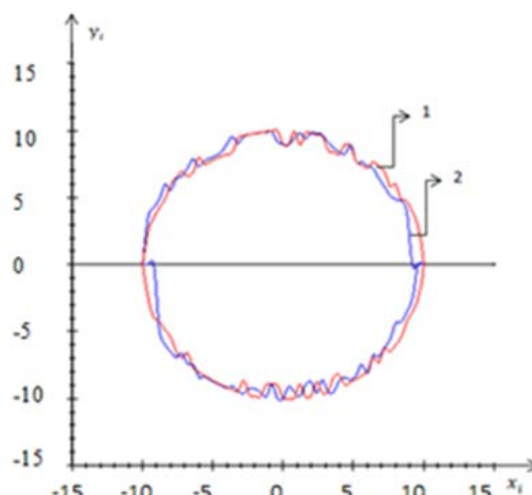
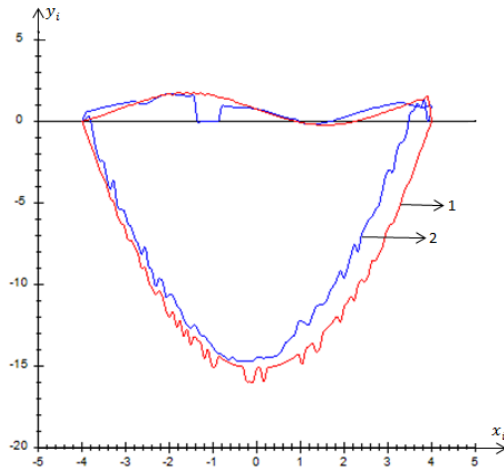
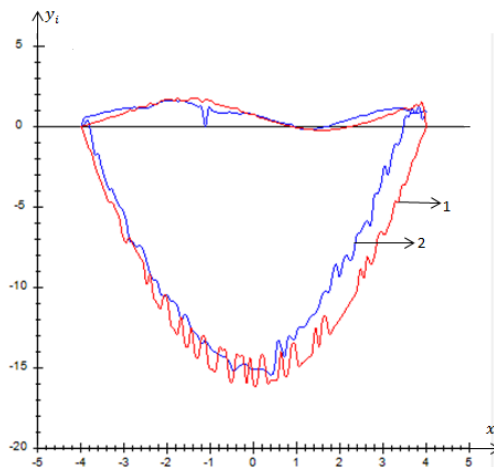


Fig. 19. $S = 100$; $l = 10 \%$; $w = 0.0817$

Рис. 19. $S = 100$; $l = 10 \%$; $w = 0,0817$

Fig. 20. $S = 200$; $l = 5\%$; $w = 0.0301$ Рис. 20. $S = 200$; $l = 5\%$; $w = 0,0301$ Fig. 21. $S = 200$; $l = 10\%$; $w = 0.0009$ Рис. 21. $S = 200$; $l = 10\%$; $w = 0,0009$

Conclusion. The main result of the present article is an introduction of a new class nonparametric estimation of mutually ambiguous functions from observations with errors. It distinguishes the problems of nonparametric estimation from the known nonparametric estimates of the function of Nadaraya-Vatsona regression. Some modifications of nonparametric estimates are given, under such conditions the attention is drawn to a method of bypassing of entered nonparametric estimates along a trajectory determined by elements of the training sample.

For simplicity of a numerical research the function described by a circle was taken, though it is not essential to the offered algorithm. In other words, the algorithms offered are suitable for reconstruction of the ambiguous dependences described by more composite curves, the character of which is apriori unknown, only a sample of observations of the studied process is known.

References

1. Nadaraia E. A. *Neparametricheskoe otsenivanie plotnosti veroiatnostei i krivoi regressii* [Nonparametric estimation of probability density and regression curve]. Tbilisi, TGU Publ., 1983, 194 p.
2. Feldbaum A. A. *Osnovy teorii optimalnykh avtomaticheskikh sistem* [Foundations of theory of optimal automatic systems]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1963, 552 p.
3. Tsypkin Ia. Z. *Adaptatsiia i obuchenie v avtomaticheskikh sistemakh* [Adaptation and learning in automatic systems]. Moscow, Nauka Publ., 1968, 400 p.
4. Medvedev A. V. *Osnovy teorii adaptivnykh sistem* [Fundamentals of the theory of adaptive systems]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2015, 526 p.
5. Eikhhoff P. *Osnovy identifikatsii sistem upravleniia* [Fundamentals of identification of control systems]. Moscow, Mir Publ., 1975, 683 p.
6. Vasilev V. A., Dobrovidov A. V., Koshkin G. M. *Neparametricheskoe otsenivanie funktsionalov ot raspredelenii statsionarnykh posledovatelnostei* [Nonparametric estimation of functionals of stationary sequences distributions]. Moscow, Nauka Publ., 2004, 508 p.
7. Zhivogliadov V. P., Medvedev A. V., Tishina E. V. *Vosstanovlenie neodnoznachnykh staticheskikh kharakteristik po eksperimentalnym dannym: Avtomatizatsiia promyshlennogo eksperimenta* [Reconstruction of ambiguous static characteristics from experimental data: Automation of the industrial experiment]. Frunze, Ilim Publ., 1973, P. 32–39.
8. Chernova S. S., Shishkina A. V. [On nonparametric estimation of mutually ambiguous functions from observations]. *Molodoi uchenyi*. 2017, No. 25, P. 13–20 (In Russ.).
9. *Metody klassicheskoi i sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniia. T. 2: Sintez regulatorov i teoriiia optimizatsii sistem avtomaticheskogo upravleniia* [Methods of classical and modern automatic control theory. Vol. 2. Controller Synthesis and optimization theory, automatic control systems]. Moscow, MGTU im. N. E. Baumana Publ., 2004, 640 p.
10. Feldbaum A. A. *Elektricheskie sistemy avtomaticheskogo regulirovaniia* [Electric automatic control system]. Moscow, Gosudarstvennoe izdatelstvo oboronnoi promyshlennosti Publ., 1957, 809 p.
11. Voronov A. A. *Osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniia. Chast 1: Lineinye sistemy regulirovaniia odnoi velichiny* [Fundamentals of the theory of automatic control. Part 1: Linear systems regulation one size]. Leningrad-Moscow, Energiia Publ., 1965, 396 p.
12. Voronov A. A. *Osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniia. Chast 2: Spetsialnye lineinye i nelineinye sistemy avtomaticheskogo regulirovaniia odnoi velichiny* [Fundamentals of the theory of automatic control. Part 2: Special linear and nonlinear systems of automatic control of one magnitude]. Leningrad-Moscow, Energiia Publ., 1966, 364 p.
13. *Metody klassicheskoi i sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniia. T. 3: Sintez regulatorov sistem avtomaticheskogo upravleniia* [Methods of classical and modern automatic control theory. Vol. 3. Synthesis of regulators of automatic control systems]. Moscow, MGTU im. N. E. Baumana Publ., 2004, 616 p.
14. Voronov A. A. *Osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniia. Chast 3: Optimalnye mnogosviaznye i adaptivnye sistemy* [Fundamentals of the theory of automatic

control. Part 3: Optimal multivariable and adaptive systems]. Leningrad, Energiia Publ., 1970, 328 p.

15. *Metody klassicheskoi i sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniia. T. 4. Teoriia optimizatsii sistem avtomaticheskogo upravleniia* [Methods of classical and modern automatic control theory. Vol. 4. Optimization Theory, automatic control systems]. Moscow, MGТУ im. N. E. Baumana Publ., 2004, 742 p.

Библиографические ссылки

1. Надарая Э. А. Непараметрическое оценивание плотности вероятностей и кривой регрессии. Тбилиси : ТГУ, 1983. 194 с.

2. Фельдбаум А. А. Основы теории оптимальных автоматических систем. М. : Физматгиз, 1963. 552 с.

3. Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах. М. : Наука, 1968. 400 с.

4. Медведев А. В. Основы теории адаптивных систем / СибГАУ. Красноярск, 2015. 526 с.

5. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. М. : Мир, 1975. 683 с.

6. Васильев В. А., Добровидов А. В., Кошкин Г. М. Непараметрическое оценивание функционалов от распределений стационарных последовательностей. М. : Наука, 2004. 508 с.

7. Живоглядов В. П., Медведев А. В., Тишина Е. В. Восстановление неоднозначных статических характеристик по экспериментальным данным: Автоматизация промышленного эксперимента. Фрунзе : Илим, 1973. С. 32–39

8. Чернова С. С., Шишкина А. В. О непараметрическом оценивании взаимно неоднозначных функций по наблюдениям // Молодой ученый. 2017. № 25. С. 13–20.

9. Методы классической и современной теории автоматического управления : учебник. В 5 т. Т. 2. Синтез регуляторов и теория оптимизации систем автоматического управления. 2-е изд., перераб. и доп. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 640 с.

10. Фельдбаум А. А. Электрические системы автоматического регулирования. М. : Государственное изд-во оборонной промышленности, 1957. 809 с.

11. Воронов А. А. Основы теории автоматического управления. Ч. 1. Линейные системы регулирования одной величины. М. ; Л. : Энергия, 1965. 396 с.

12. Воронов А. А. Основы теории автоматического управления. Ч. 2. Специальные линейные и нелинейные системы автоматического регулирования одной величины. М. ; Л. : Энергия, 1966. 364 с.

13. Методы классической и современной теории автоматического управления : учебник. В 5 т. Т. 3. Синтез регуляторов систем автоматического управления. 2-е изд., перераб. и доп. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 616 с.

14. Воронов А. А. Основы теории автоматического управления. Ч. 3. Оптимальные многосвязные и адаптивные системы. Л. : Энергия, 1970. 328 с.

15. Методы классической и современной теории автоматического управления : учебник. В 5 т. Т. 4. Теория оптимизации систем автоматического управления. 2-е изд., перераб. и доп. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 742 с.

© Korneeva A. A., Chernova S. S.,
Shishkina A. V., 2017

ВЛИЯНИЕ РАССОГЛАСОВАНИЯ ИМПЕДАНСОВ В ТРАКТЕ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛА ПРИ КАЛИБРОВКЕ ЗАДЕРЖЕК ИМИТАТОРОВ НАВИГАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Н. М. Крат^{1,2*}, А. А. Савин²

¹АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 40

*E-mail: kratnm@iss-reshetnev.ru

Рассмотрена калибровка имитаторов навигационных сигналов (ИНС). Приведено описание погрешности измерения внутренней задержки в ИНС, вызываемой рассогласованием волновых сопротивлений ИНС, анализатора навигационных сигналов и измерительного кабеля, по которому проходит навигационный сигнал при калибровке. Цель работы – получение выражения для расчета погрешности измерения внутренней задержки ИНС при его калибровке и количественная оценка погрешности. Погрешность вызвана появлением отраженного сигнала на входе алгоритма оценки задержки сигнала. Отраженный сигнал появляется вследствие рассогласования волновых сопротивлений измерительных приборов. Приведена упрощенная математическая модель сигнала на входе алгоритма оценки задержки сигналов, проведен анализ работы корреляционного алгоритма для принятой модели сигнала, получены два выражения для расчета систематической погрешности оценки задержки и моделированием оценена их точность. Первое выражение является универсальным для всех навигационных сигналов, второе – более точное и учитывает спектральные характеристики имитируемого сигнала. Дана количественная оценка погрешности, полученная с учетом характеристик современных измерительных приборов – при длине измерительного кабеля около 1 м она может достигать 100–150 пс. Сделано заключение о том, что при современных требованиях к калибровке ИНС влияние рассогласования импедансов должно быть учтено. Приведенная информация может быть использована при оценке погрешности измерения внутренней задержки в навигационной аппаратуре потребителя при её калибровке с применением ИНС.

Ключевые слова: имитатор навигационных сигналов, калибровка, рассогласование импедансов, систематическая погрешность, внутренняя задержка.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 3, P. 520–524

IMPEDANCE MISMATCH INFLUENCE AT INTERNAL DELAY OF NAVIGATION SIGNAL SIMULATOR CALIBRATION

N. M. Krat^{1,2*}, A. A. Savin²

¹JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

²Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
40, Lenin Av., Tomsk, 634050, Russian Federation

*E-mail: kratnm@iss-reshetnev.ru

This paper is devoted to navigation signal simulator calibration. The description of uncertainty estimation of internal signal simulator delay, which is caused by impedance of measurement equipment (navigation signal simulator, analyzer and measurement cable) mismatch, is shown in the paper. The aim of research is to get expression to count uncertainty of simulator internal delay and to give its quantitative assessment. The uncertainty is caused by presence of reflected signal at the input of signal delay estimation algorithm. Reflected signal has place because input/output impedances of measurement equipment are different. The simplified mathematical model of signal at the signal delay estimation algorithm input is given. Correlation algorithm work for given model of signal has been analyzed. Two expressions for systematic uncertainty of delay estimation count have been derived and their inaccuracy has been estimated by means of modelling. The first expression is universal for all variety of navigation signals; the second is more accurate and takes into account spectral characteristics of the concrete navigation signal. The quantitative assessment of uncertainty, based on modern measurement equipment is given – at the length of measurement cable about one meter systematic uncertainty can reach 100–150 picoseconds. Conclusion was made, that at modern requirements to navigation

signal simulators calibration, impedance mismatch must be taken into account. The information, mentioned in this paper, can be used at internal delay of navigation receivers' estimation when receivers are calibrated by means of navigation signal simulator.

Keywords: navigation signal simulator, calibration, impedance mismatch, systematic uncertainty, internal delay.

Введение. Для оценки точностных характеристик навигационной аппаратуры потребителей (НАП) – приемников сигналов спутниковых радионавигационных систем, а также специализированных приемников из состава наземного сегмента космического комплекса (НС КК) системы ГЛОНАСС, могут быть применены имитаторы навигационных сигналов (ИНС). Учитывая тенденции развития НАП, в частности угломерной и синхронизирующей, необходимо подтверждать погрешность измерения задержки НАП с субнаносекундным уровнем точности [1–3]. Требования к приёмникам из состава НС КК аналогичны: неисключённая систематическая погрешность измерения задержки не должна превышать долей наносекунд.

Необходимым условием для этого является наличие ИНС, калиброванного с лучшей точностью. Анализ доступных источников показал, что в настоящее время при прецизионной калибровке ИНС не оценивается и не учитывается влияние рассогласования импедансов в линии передачи высокочастотного навигационного сигнала [4–6]. Различие рассогласований входных импедансов аппаратуры, используемой для калибровки ИНС и НАП, тестируемой с использованием ИНС, может привести к появлению дополнительной систематической погрешности оценки точностных характеристик НАП. В связи с этим целью данной работы является определение величины погрешности оценки задержки, вызванной рассогласованием для определения её вклада в бюджет погрешности калибровки ИНС.

Математическая модель сигнала на входе устройства обработки сигналов с учетом рассогласования. На рис. 1 изображена схема калибровки ИНС (управляющая ЭВМ, стандарт частоты, кабельные сборки, необходимые для подключения вспомогательных элементов схемы, не показаны). В общем случае калибровка задержки ИНС заключается в том, что ИНС настраивается на формирование навигационного сигнала с заданной задержкой, устройство обработки сигналов (УОС) производит измерение

задержки, и рассчитывается калибровочная поправка, соответствующая внутренней задержке сигнала в ИНС. При этом каждая имеющаяся в линии передачи навигационного сигнала электрическая неоднородность приводит к появлению дополнительного отраженного сигнала. На рис. 1 изображен только первый отраженный сигнал, попадающий на вход УОС и оказывающий наибольшее влияние на оценку задержки, так как он обладает наибольшей мощностью по сравнению с остальными.

Модель отраженного сигнала дополнительно упрощена за счет того, что рассматривается только сигнал, отраженный от высокочастотных разъемов УОС и ИНС, и не рассматриваются сигналы, вызванные рассогласованиями внутри ВЧ-кабеля, ИНС, УОС и переходов. Тогда, если принять, что ВЧ-кабель не вносит никаких искажений в сигнал (АЧХ постоянна и ФЧХ линейна в полосе частот сигнала), справедлива следующая модель сигнала на нулевой частоте на входе алгоритма обработки, реализованного в УОС:

$$s_{\text{УОС}}(t) = s_{\text{ИНС}}(t - t_{\text{каб}}) + |\Gamma| \cdot s_{\text{ИНС}}(t - 3 \cdot t_{\text{каб}}) \times \exp(j \cdot [\varphi_{\Gamma} - 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot 3 \cdot t_{\text{каб}}]), \quad (1)$$

где $s_{\text{УОС}}$ – сигнал на входе УОС; $s_{\text{ИНС}}$ – сигнал на выходе ИНС; $t_{\text{каб}}$ – задержка на распространение сигнала в кабеле; $|\Gamma|$ – произведение модулей коэффициентов отражения (КО) ИНС и УОС; φ_{Γ} – сумма фаз КО ИНС и УОС; f_0 – несущая частота сигнала.

Анализ работы алгоритма корреляционной обработки для принятой модели отраженного сигнала. Оптимальным методом при оценке задержки сигнала в присутствии белого гауссовского шума с точки зрения минимума среднего квадрата погрешности оценки является корреляционный метод [7–9]. Оценка задержки корреляционным методом соответствует моменту времени, при котором модуль огибающей взаимокорреляционной функции входного и опорного сигналов максимален.

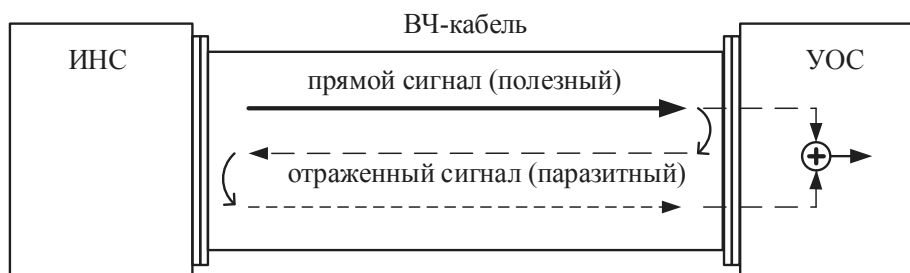


Рис. 1. Появление отраженного сигнала при калибровке ИНС

Fig. 1. Appearance of a reflected signal during ANN calibration

В силу линейности алгоритма корреляционной обработки модели сигнала (1) соответствует комплексная огибающая сигнала на выходе коррелятора:

$$K_{\Sigma}(t) = K_0(t) + |\Gamma| \cdot K_0(t - \Delta t) \times \exp(j[\varphi_{\Gamma} - 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot \Delta t]), \quad (2)$$

где $K_0(t)$ – автокорреляционная функция сигнала на выходе ИНС; $K_{\Sigma}(t)$ – взаимная корреляционная функция между сигналом на выходе ИНС и сигналом на входе УОС; $\Delta t = 2 \cdot t_{\text{каб}}$ – задержка отраженного сигнала по отношению ко времени прихода прямого сигнала (дополнительная задержка).

Модуль корреляционной функции (2) для значений $|\Gamma| \ll 1$ приблизительно равен

$$|K_{\Sigma}(t)| = |K_0(t)| + |\Gamma| \times |K_0(t - \Delta t)| \cdot \cos(\varphi_{\Gamma} - 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot \Delta t). \quad (3)$$

Выражение (3) получено в предположении, что фаза комплексной автокорреляционной функции сигнала на выходе ИНС постоянна на интервале от момента прихода прямого сигнала до прихода отраженного сигнала, т. е. $\arg(K_0(t)) = \arg(K_0(t - \Delta t))$.

Погрешность оценки задержки как разность положений максимумов функций $K_0(t)$ и $K_{\Sigma}(t)$ может быть получена в результате решения следующего уравнения относительно σ_t :

$$|K_0(t_0 + \sigma_t)|' + |\Gamma| \cdot |K_0(t_0 - \Delta t + \sigma_t)|' \times \cos(\varphi_{\Gamma} - 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot \Delta t) = 0, \quad (4)$$

где t_0 – момент, соответствующий максимуму корреляционной функции; σ_t – погрешность оценки задержки корреляционным методом.

При небольших значениях σ_t решение (4) имеет следующий вид:

$$\sigma_t = -|\Gamma| \cdot \frac{|K_0(\Delta t)|'}{|K_0(0)|'} \cdot \cos(\varphi_{\Gamma} - 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot \Delta t).$$

Для получения решения уравнения (4) в аналитическом виде необходимо аппроксимировать функцию $|K_0(t)|$ в районе основного максимума некоторой аналитической функцией. Ниже приведены решения при аппроксимации функции $|K_0(t)|$ параболой и гауссоидой:

$$\sigma_t = -|\Gamma| \cdot \Delta t \cdot \cos(\varphi_{\Gamma} - 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot \Delta t), \quad (5)$$

$$\sigma_t = \frac{-|\Gamma| \cdot \Delta t \cdot \cos(\varphi_{\Gamma} - 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot \Delta t)}{\exp\left(-\frac{\Delta t^2}{c^2}\right) + |\Gamma| \cdot \cos(\varphi_{\Gamma} - 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot \Delta t)}, \quad (6)$$

где c – коэффициент, пропорциональный длительности чипа дальномерного кода сигнала на выходе ИНС.

На рис. 2 приведены зависимости погрешности оценки задержки, полученные для сигнала ГЛОНАСС L3OC [10] (тактовая частота 10,23 МГц, $|\Gamma| = 0,01$, φ_{Γ} рассчитывается для каждого значения дополнительной задержки из условия, что прямой и отраженный сигналы синфазны).

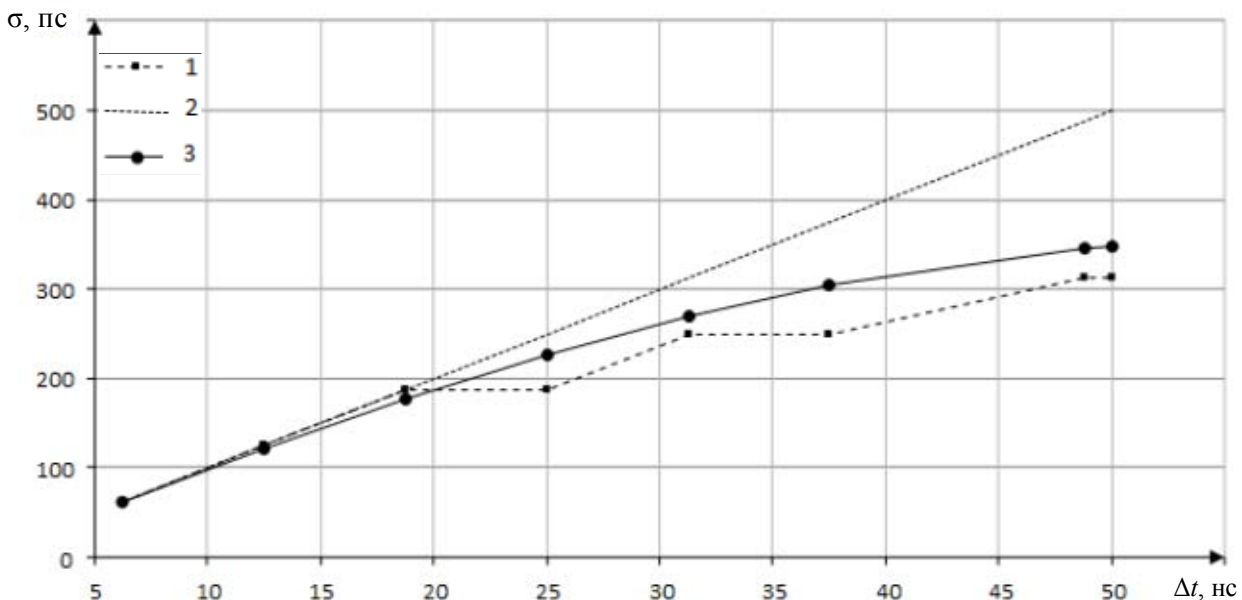


Рис. 2. Погрешности оценки задержки: 1 – значение погрешности, определенное по результатам имитационного моделирования в среде MatLAB для заданных условий работы; 2 – значение, вычисленное по (5); 3 – значение, вычисленное по (6) при $c = 83$ нс

Fig. 2. Delay evaluation errors: 1 is the error value determined from the simulation results in the MatLAB environment for the specified operating conditions, 2 is the value calculated from (5), 3 is the value calculated from (6) at $c = 83$ ns

Характеристики измерительных устройств, связанные со значением КО

Устройство	Характеристика и ее значение	Значение КО
ИНС Spirent GSS 9000 [12]	КСВН ВЧ-выхода 1,2	0,09 (–20,8 дБ)
ИНС Aeroflex Avionics GPSG-1000 [13]	КСВН ВЧ-выхода 1,3	0,13 (–17,7 дБ)
Цифровой осциллограф Agilent DSO9404a [14]	Входное сопротивление 50 Ом $\pm$ 2,5 %	0,0123 (–38,2 дБ)
Цифровой осциллограф Rohde&Schwarz RTO1044 [15]	Входное сопротивление 50 Ом $\pm$ 1,5 %	0,0074 (–42,6 дБ)

Анализ рис. 2 приводит к выводу, что выражения (5) и (6) достаточно точно описывают погрешность, полученную по результатам моделирования при значениях Δt менее 50 нс (что соответствует длине измерительного кабеля 5,76 м при коэффициенте укорочения волны 1,3).

При этом погрешность, полученная по (6), является более близкой к результатам моделирования (разность фактического значения и расчетного не превышает 60 пс). Это связано в первую очередь с тем, что выражение (6) учитывает спектральные характеристики сигнала (параметр c). Выражение (5) является более универсальным и менее точным (разность пропорциональна $|\Gamma|$ и Δt и не превышает 200 пс).

Как следует из (4), погрешность (5) и (6) напрямую зависит от погрешности аппроксимации первой производной $|K_0(t)|$, которая определяется видом и значениями параметров аппроксимирующей функции, а также интервалом аппроксимации. Чтобы получить наиболее точное выражение для расчета погрешности, вызванной рассогласованием при различных значениях дополнительной задержки, необходимо выбирать интервал аппроксимации производной модуля автокорреляционной функции сигнала на выходе ИНС, соответствующий диапазону изменения дополнительной задержки отраженного сигнала, имеющему место при калибровке ИНС. Этот диапазон необходимо выбирать, исходя из следующих фактов:

- 1) длина измерительного кабеля обычно составляет единицы метров (1–5 м);
- 2) скорость распространения сигнала в кабеле меньше скорости света на 15–30 %.

Учитывая эти факты, диапазон значений дополнительной задержки целесообразно задать от 8 до 50 нс. При этом для расчета погрешности можно использовать выражение (5).

Количественная оценка значения погрешности. Для количественной оценки исследуемой погрешности необходимо задать диапазон возможных значений параметров отражения. Источником этих данных могут служить технические характеристики ИНС и УОС. Следует отметить, что для точных оценок параметров сигналов ИНС обычно используются анализаторы навигационных сигналов, представляющие собой совокупность цифрового осциллографа и специального программного обеспечения [11]. В таблице приведены технические характеристики приборов, определяющие значения $|\Gamma|$.

Анализ данных, представленных в таблице, позволяет сделать вывод, что значение $|\Gamma|$, т. е. произведения модулей КО ИНС и УОС, может достигать значений от 0,00067 до 0,0016 при значении импеданса разъе-

мов кабеля 50 Ом. Поскольку импеданс разъемов кабелей отличается от номинального значения (КСВН до 1,15 для прецизионных соединителей), диапазон значений $|\Gamma|$ будет составлять от 0,012 до 0,017.

Подстановка имеющихся значений параметров отражения в (5) позволяет заключить, что значение систематической погрешности кодовой оценки задержки ИНС, вызванной отраженным сигналом при калибровке ИНС, может достигать 100–150 пс для кабеля длиной 1 м и 600–750 пс для кабеля длиной 5 м (без учета потерь в кабеле) для различных сигналов, значений несущей частоты и параметров отражения.

Заключение. В данной статье был проведен анализ влияния рассогласования импедансов в линии передачи высокочастотного сигнала при калибровке ИНС. В результате анализа получена модель сигнала на входе алгоритма обработки и определены предельные значения систематической погрешности измерения задержки. Учитывая, что калибровка ИНС должна проводиться с субнаносекундным уровнем точности, необходимо учитывать влияние рассогласования. Самый простой способ учета – измерение значений параметров отражения, например, рефлектометрами или векторными анализаторами цепей с последующим вычетом рассчитанных значений погрешности из измеренных УОС задержек. Получены выражения для расчета значения погрешности по известным параметрам отражения. Для сигнала ГЛОНАСС ЛЗОС расчетные значения отличаются от истинного не более чем на 60 и 200 пс (для выражений (5) и (6) соответственно). Поскольку данный сигнал является сигналом ГЛОНАСС с наиболее широким спектром, можно предположить, что для других сигналов погрешность будет ещё меньше.

Библиографические ссылки

1. Поверка радионавигационного оборудования космического применения / В. И. Крившич [и др.] // Навигационные спутниковые системы, их роль и значение в жизни современного человека : тезисы докладов 2-й Междунар. науч.-техн. конф. (10–14 окт. 2012 г.). С. 72–75.
2. Гребенников А. В. Совместная фильтрация кодовых и фазовых измерений в высокоточной аппаратуре радионавигации // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. № 9. С. 118–128.
3. Аппаратура для калибровки и метрологической проверки источников навигационных сигналов глобальных навигационных спутниковых систем / А. В. Гребенников [и др.] // Навигационные спутниковые системы, их роль и значение в жизни современного человека : тезисы докл. 2-й Междунар. науч.-техн. конф. (10–14 окт. 2012 г.). С. 239–241.

4. Absolute calibration of dual frequency timing receivers for Galileo / B. P. B. Elwischger [et al.] // European Navigation Conference (ENC). Vienna, 2013.

5. Absolute calibration of time receivers with DLR's GPS/Galileo HW simulator / S. Thoelet [et al.] // 39th annual precise time and time interval (PTTI) meeting. Pp. 323–330.

6. Fischer J., Perdue L. A Calibrated Precision GNSS Simulator for Timing Applications // Proceedings of the 45th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting. Washington, 2013. Pp. 107–111.

7. Ширман Я. Д., Голиков В. Н. Теоретические основы радиолокации : учеб. пособие для вузов. М. : Советское радио, 1970. 560 с.

8. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Радио и связь, 1989. 656 с.

9. Радиотехнические системы : учебник / Ю. М. Казаринов [и др.] ; под ред. Ю. М. Казаринова. М. : Академия, 2008. 529 с.

10. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС : интерфейсный контрольный документ. Навигационный радиосигнал открытого доступа с кодовым разделением в диапазоне L3. Редакция 1.0. М. : АО «Российские космические системы», 2016. 57 с.

11. Крат Н. М., Савин А. А., Шарыгин Г. С. Контрольно-проверочная аппаратура системы автономной навигации космических аппаратов // Доклады ТУСУР. 2014. № 1 (31). С. 28–32.

12. Spirent GSS9000 constellation simulator datasheet [Электронный ресурс]. URL: https://www.spirent.com/-/media/Datasheets/Positioning/GSS9000_Specifications.pdf (дата обращения: 10.05.2016).

13. Avionics GPSG-1000 GPS/Galileo Portable Positional Simulator datasheet [Электронный ресурс]. URL: http://alfa-test.ru/public/catalog/files/1062_gpsg-1000iss4.pdf (дата обращения: 10.05.2016).

14. Agilent Technologies Infiniium 9000 Series Oscilloscopes Data Sheet [Электронный ресурс]. URL: http://data.datasheetlib.com/pdf1/13/95/139508/n2902a_441f06e901.pdf (дата обращения: 10.05.2016).

15. R&S RTO digital oscilloscope specifications [Электронный ресурс]. URL: https://cdn.rohde-schwarz.com/campaigns-media/data/sota/rto/downloads/RTO_dat-sw_en_5214-5155-22_v1900.pdf (дата обращения: 10.05.2016).

References

1. Krivshich V. I., Krasnenko S. S., Pichkalev A. V., Shkol'nyi V. N. [Checking of the radionavigating equipment for space application]. *Tezisy dokl. 2 Mezhdunar. Nauch.-tekhnich. konf. "Navigatsionnye sputnikovye sistemy, ikh rol' i znachenie v zhizni sovremennogo cheloveka"* [Proc. 2nd Int. scientific and technical conference "Navigation satellite systems: their part and significance in the life of modern man"]. 2012, P. 72–75 (In Russ.).

2. Grebennikov A. V. [Combined filtration of code and phase measurements in the high precision radio navigation equipment]. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*. 2012, No. 9, P. 118–128 (In Russ.).

3. Grebennikov A. V., Kondrat'ev A. S., Sizov S. V., Khazagarov Yu. G. [Equipment for the calibration and the metrological check of the sources of navigation signals GNSS]. *Tezisy dokl. 2 mezhdunar. nauch.-tekhnich. konf. "Navigatsionnye sputnikovye sistemy, ikh rol' i znachenie v zhizni sovremennogo cheloveka"* [Proc. 2nd Int. scientific and technical conference "Navigation satellite systems: their part and significance in the life of modern man"]. 2012, P. 239–241 (In Russ.).

4. Elwischger B. P. B., Thoelet S., Suess M., Furthner J. Absolute calibration of dual frequency timing receivers for Galileo. *European Navigation Conference (ENC)*. Vienna, 2013.

5. Thoelet S., Grunert U., Denks H., Furthner J. Absolute calibration of time receivers with DLR's GPS/Galileo HW simulator. 39th annual precise time and time interval (PTTI) meeting. P. 323–330.

6. Fischer J., Perdue L. A Calibrated Precision GNSS Simulator for Timing Applications. Proceedings of the 45th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, Washington 2013. P. 107–111.

7. Shirman Ya. D., Golikov V. N. *Teoreticheskie osnovy radiolokatsii* [Theoretical bases of radiolocation]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1970, 560 p.

8. Levin B. R. *Teoreticheskie osnovy statisticheskoi radiotekhniki* [Theoretical bases of statistical radio engineering] 3rd edition, complemented and conversed]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1989, 656 p.

9. Grishin Yu. P., Ipatov V. P. et al. *Radioelektronnye sistemy*. [Radio engineering systems], Moscow, Akademiya Publ., 2008, 529 p.

10. *Global'naya navigatsionnaya sputnikovaya sistema GLONASS. Interfeisnyi kontrol'nyi dokument. Navigatsionnyi radiosignal otkrytogo dostupa s kodovym razdeleniem v diapazone L3. Redaktsiya 1.0*. [Global navigation satellite system GLONASS. Interface control document. Open service navigation signal with code division in L3 frequency band]. Moscow, 2016, Rossiyskie kosmicheskie sistemy Publ., 57 p.

11. Kрат N. M., Savin A. A., Sharygin G. S. [Test equipment for autonomous navigation system of space vehicles]. *Doklady TUSUR*. 2014, No. 1 (31), P. 28–32 (In Russ.).

12. *Spirent GSS9000 constellation simulator datasheet*. Available at: https://www.spirent.com/-/media/Datasheets/Positioning/GSS9000_Specifications.pdf (accessed: 10.05.2016).

13. *Avionics GPSG-1000 GPS/Galileo Portable Positional Simulator datasheet*. Available at: http://alfa-test.ru/public/catalog/files/1062_gpsg-1000iss4.pdf (accessed: 10.05.2016).

14. *Agilent technologies infiniium 9000 series oscilloscopes datasheet*. Available at: http://data.datasheetlib.com/pdf1/13/95/139508/n2902a_441f06e901.pdf (accessed: 10.05.2016).

15. *R&S RTO digital oscilloscope specifications*. Available at: https://cdn.rohde-schwarz.com/campaigns-media/data/sota/rto/downloads/RTO_dat-sw_en_5214-5155-22_v1900.pdf (accessed: 10.05.2016).

ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАФОВ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ПУЗЫРЬКОВОЙ СОРТИРОВКИ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

А. А. Кузнецов*, В. В. Кишкан

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: kuznetsov@sibsau.ru

Определение графа Кэли было дано известным английским математиком Артуром Кэли в XIX веке для представления алгебраической группы, заданной фиксированным множеством порождающих элементов. В настоящее время графы Кэли нашли широкое применение как в математике, так и в прикладных задачах. В частности, указанные графы используются для представления компьютерных сетей, в том числе для моделирования топологий многопроцессорных вычислительных систем – суперкомпьютеров. Это связано с тем, что графы Кэли имеют много привлекательных свойств, из которых выделим их регулярность, вершинную транзитивность, малые диаметр и степень при достаточно большом количестве вершин в графе. Например, такие базовые топологии сети, как «кольцо», «гиперкуб» и «тор», являются графами Кэли. При помощи суперкомпьютерных вычислений получены ранее неизвестные характеристики графов Кэли модифицированной пузырьковой сортировки размерности 14 и 15.

Ключевые слова: граф Кэли, многопроцессорная вычислительная система, граф модифицированной пузырьковой сортировки.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 3, P. 525–529

USING HIGH-PERFORMANCE COMPUTATIONS FOR STUDYING MODIFIED BUBBLE-SORT GRAPHS

A. A. Kuznetsov*, V. V. Kishkan

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: kuznetsov@sibsau.ru

The definition of the Cayley graph was given by the famous English mathematician Arthur Cayley in the XIX century to represent algebraic group defined by a fixed set of generating elements. At present, Cayley graphs are widely used both in mathematics and in applications. In particular, these graphs are used to represent computer networks, including the modeling of topologies of multiprocessor computer systems – supercomputers. This is due to the fact that Cayley graphs have many attractive properties such as regularity, vertex transitive, small diameter and degree at a sufficiently large number of vertices in the graph. For example, such a basic network topology as the “ring”, “hypercube” and “torus” are the Cayley graphs. Using supercomputer computations we obtained the previously unknown characteristics of modified bubble-sort Cayley graphs of dimensions 14 and 15.

Keywords: the Cayley graph, a multiprocessor computing system, a modified bubble-sort graph.

Введение. Определение графа Кэли было дано известным английским математиком Артуром Кэли в XIX веке для представления алгебраической группы, заданной фиксированным множеством порождающих элементов.

В последние десятилетия теория графов Кэли развивается как отдельная большая ветвь теории графов. Графы Кэли находят применение как в математике, так и за ее пределами. Эффективное применение графов Кэли нашли в информационных технологиях после пионерской работы 1986 года С. Эйкерса и Б. Кришнамурти [1], которые впервые предложили

применять указанные графы для представления компьютерных сетей, в том числе для моделирования топологий многопроцессорных вычислительных систем (МВС) – суперкомпьютеров. С тех пор данное направление активно развивается [2–11]. Это связано с тем, что графы Кэли имеют много привлекательных свойств, из которых стоит отметить их регулярность, вершинную транзитивность, малые диаметр и степень при достаточно большом количестве вершин в графе. Например, такие базовые топологии сети, как «кольцо», «гиперкуб» и «тор», являются графами Кэли.

Напомним определения основных терминов, используемых в работе.

Пусть X – порождающее множество группы G , т. е. $G = \langle X \rangle$. Графом Кэли $\Gamma = \text{Cay}(G, X) = (V, E)$ называют ориентированный граф, обладающий следующими свойствами:

а) множество вершин $V(\Gamma)$ соответствуют элементам группы G ;

б) множество ребер $E(\Gamma)$ состоит из всех упорядоченных пар (g, xg) , где $g \in G$ и $x \in X$.

В дальнейшем будем считать порождающее множество X симметричным и свободным от единичного элемента группы, т. е. $x \in X \Rightarrow x^{-1} \in X$ и $e \notin X$. Поскольку X является свободным от единичного элемента, то граф Γ не содержит петель. Симметричность порождающего множества означает, что граф будет неориентированным и без кратных ребер, т. е. если в графе имеется ребро из g в xg , то оно совпадает с ребром из xg в $x^{-1}(xg) = g$.

Таким образом, $\Gamma = \text{Cay}(G, X) = (V, E)$, где $V = G$ и $E = \{(g, xg) | g \in G, x \in X\}$.

Количество вершин $|V|$ равно порядку группы G . Граф Кэли является регулярным, и его степень s , т. е. количество ребер, выходящее из каждой вершины, равно числу порождающих элементов группы: $s = |X|$.

Шаром K_s радиуса s группы G будем называть множество всех ее элементов, которые могут быть представлены в виде групповых слов в алфавите X длиной, не превышающей s . Для каждого целого неотрицательного s можно определить функцию роста группы $F(s)$, которая будет равна числу элементов группы G относительно X , представимых в виде несократимых групповых слов длиной s . Таким образом,

$$F(0) = |K_0| = 1, F(s) = |K_s| - |K_{s-1}| \text{ при } s \in \mathbb{N}.$$

Как правило, функцию роста конечной группы представляют в виде таблицы, в которую записывают ненулевые значения $F(s)$.

Отметим также, что при вычислении функции роста группы мы параллельно выясняем характеристики соответствующего графа Кэли, например, такие как диаметр и средний диаметр [12]. Пусть $F(s_0) > 0$, но $F(s_0 + 1) = 0$, тогда s_0 будет являться диаметром графа Кэли группы G в алфавите порождающих X , который мы будем обозначать $D_X(G)$. Соответственно, средний диаметр $\bar{D}_X(G)$ равен средней длине минимальных (несократимых) групповых слов.

Вычисление диаметра графа Кэли большой конечной группы является хотя и разрешимой, но весьма сложной проблемой. Это связано с тем, что в общем случае задача по определению минимального слова в группе, как показали С. Ивен и О. Голдрейх в 1981 году [13], является NP-трудной (nondeterministic polynomial). Таким образом, в наихудшем случае количество элементарных операций, которые необходимо выполнить для решения указанной задачи, представляет собой экспоненциальную функцию от $|X|$. Поэтому для эффективного решения задач на графах Кэли, имеющих

большое количество вершин, необходимо применять МВС.

Пусть $S_n = \langle X_n \rangle$, где $X_n = \{(i, i+1) | i = 1, 2, \dots, n\}$ – симметрическая группа, порожденная множеством транспозиций X_n . Граф Кэли $\text{BS}_n = \text{Cay}(S_n, X_n)$ называют графом пузырьковой сортировки (bubble-sort graph) [5]. Свойства данного графа хорошо известны [5], в частности,

$$D_{X_n}(S_n) = \frac{n(n-1)}{2} \text{ и } \bar{D}_{X_n}(S_n) = \frac{D_{X_n}(S_n)}{2}.$$

Пусть теперь $S_n = \langle \hat{X}_n \rangle$, где $\hat{X}_n = X_n \cup \{(1, n)\}$.

Граф Кэли $\text{MBS}_n = \text{Cay}(S_n, \hat{X}_n)$ называют графом модифицированной пузырьковой сортировки (modified bubble-sort graph) [5]. На сегодняшний день известны характеристики данного графа только для $n \leq 13$. В работе [14] получено, что

$$D_{\hat{X}_n}(S_n) = \left\lfloor \frac{n^2}{4} \right\rfloor \text{ и } \bar{D}_{\hat{X}_n}(S_n) = \frac{n^2 - n + 1}{6} \text{ при } n \leq 13.$$

В настоящей работе представлена модифицированная версия алгоритма А–I из [15], на основе которого при помощи суперкомпьютерных вычислений получены ранее неизвестные характеристики MBS_n -графов для $n = 14$ и 15 .

Алгоритм А–I

Вход: конечная группа $G = \langle X, \circ \rangle$, где $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ – порождающее множество G .

Выход: диаметр $D_X(G)$, средний диаметр $\bar{D}_X(G)$ графа Кэли $\Gamma = \text{Cay}(G, X)$, а также функция роста $F(s)$ группы G , где $0 \leq s \leq D_X(G)$.

1. $s = 0$, $K_0 = \{e\}$, $F(0) = 1$, $P = K_0$.
2. $s = s + 1$.
3. $K_s = K_{s-1}$.
4. $\forall x \in X$ и $\forall p \in P$:
 - 4.1. $g = x \circ p$;
 - 4.2. если $g \in K_s$, то $K_s = K_s \cup \{g\}$.
5. $P = K_s - K_{s-1}$.
6. $F(s) = |P|$.
7. Если $F(s) > 0$, то переход п. 2; иначе $s_0 = s - 1$, переход п. 8.

$$8. D_X(G) = s_0, \bar{D}_X(G) = \frac{1}{|K_{s_0}|} \sum_{s=0}^{s_0} F(s) \cdot s.$$

9. Выход.

В [15] доказана корректность алгоритма А–I, а также получено, что $T(|G|) \in \Theta(|G|^2)$ при $|X| \ll |G|$, где $T(|G|)$ – вычислительная сложность алгоритма А–I и Θ – одновременно верхняя и нижняя асимптотическая оценка сложности.

Для снижения вычислительной сложности требуется способ для нумерации элементов [15]. Пусть $g = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ – произвольная перестановка из S_n .

Используя факториальную систему счисления можно однозначно определить номер перестановки (при этом нумерация будет начинаться с нуля). Определим биективное отображение φ следующего вида:

$$g \xrightarrow{\varphi} n_g = \sum_{k=1}^n b_k k!$$

Здесь n_g представляет собой целое неотрицательное число, записанное в факториальной системе счисления, при этом коэффициент b_k при множителе $k!$ будет обозначать число инверсий для элемента α_{k+1} в том множестве, в котором производятся перестановки (количество элементов, меньших α_{k+1} , но стоящих правее его в рассматриваемой перестановке). Легко увидеть, что n_g пробегает все значения от 0 до $n!-1$.

Модифицируем алгоритм А-I следующим образом. В п. 1 добавим булев вектор V , размерностью $n!$, все элементы которого первоначально равны 0. Для удобства индексация элементов V начинается с 0. Ввиду того, что $K_0 = \{e\}$ и $\varphi(e) = 0$, запишем $V_0 = 1$.

Заменяем п. 4.2 алгоритма А-I на следующий:

4.2. если $V_{n_g} = 0$, то $V_{n_g} = 1$ и $K_s = K_s \cup \{g\}$.

Поскольку сложность процедуры перевода перестановки в число и обратно равна $\Theta(1)$, то согласно [15] сложность модифицированного алгоритма А-I будет равна $\Theta(|G|)$.

Также отметим, что в п. 4.1 все элементы g вычисляются независимо друг от друга, поэтому этот уча-

сток алгоритма можно легко распараллелить. В этом случае сначала параллельно вычисляются все произведения g , а затем для каждого элемента получившегося массива последовательно выполняется п. 4.2.

Исследование MBS-графов. Модифицированный алгоритм А-I был реализован на языке C++ и апробирован на 96-ядерном сервере суперкомпьютера СФУ, при этом было задействовано 512 Гб оперативной памяти и 8 Тб дискового пространства. В результате были вычислены функции роста групп $S_{14} = \langle \hat{X}_{14} \rangle$ и $S_{15} = \langle \hat{X}_{15} \rangle$. Затраченное на расчеты время равно примерно 2,5 часа для $n = 14$ и 46 часов для $n = 15$. В табл. 1, 2 приведены функции роста групп S_{14} и S_{15} , а на рис. 1, 2 – их графики. Из табл. 1, 2 следует, что

$$D_{\hat{X}_{14}}(S_{14}) = 49 = \frac{14^2}{4}, \quad \bar{D}_{\hat{X}_{14}}(S_{14}) = 30\frac{1}{2} = \frac{14^2 - 14 + 1}{6},$$

$$D_{\hat{X}_{15}}(S_{15}) = 56 = \left\lfloor \frac{15^2}{4} \right\rfloor,$$

$$\bar{D}_{\hat{X}_{15}}(S_{15}) = 35\frac{1}{6} = \frac{15^2 - 15 + 1}{6}.$$

Таким образом мы можем расширить результат из [14]:

Теорема. Пусть $S_n = \langle \hat{X}_n \rangle$ и $n \leq 15$. Тогда верно, что

$$D_{\hat{X}_n}(S_n) = \left\lfloor \frac{n^2}{4} \right\rfloor \text{ и } \bar{D}_{\hat{X}_n}(S_n) = \frac{n^2 - n + 1}{6}.$$

Таблица 1

Функция роста группы S_{14} в алфавите $\hat{X}_{14}$

s	$F(s)$	s	$F(s)$	s	$F(s)$	s	$F(s)$	s	$F(s)$
0	1	10	1144066	20	523576508	30	7875671024	40	439630193
1	14	11	2496144	21	807898884	31	8184285564	41	177894717
2	105	12	5200300	22	1206399194	32	8059876006	42	59073300
3	560	13	10399573	23	1741769068	33	7486458696	43	15497794
4	2380	14	20044817	24	2428791549	34	6521589932	44	3095274
5	8568	15	37346764	25	3266926299	35	5291298298	45	457459
6	27132	16	67385500	26	4232447674	36	3964966720	46	46501
7	77520	17	117857285	27	5272211438	37	2715665810	47	2912
8	203490	18	199872075	28	6301765938	38	1678335828	48	93
9	497420	19	328616470	29	7210522410	39	920955932	49	1
$ S_{14} = 14! = 87178291200$									

Таблица 2

Функция роста группы S_{15} в алфавите $\hat{X}_{15}$

s	$F(s)$	s	$F(s)$	s	$F(s)$	s	$F(s)$	s	$F(s)$
0	1	12	9657700	24	8330511890	36	111514773216	48	723446997
1	15	13	20058300	25	12267072742	37	108665304904	49	217500207
2	120	14	40115312	26	17570631028	38	100844738930	50	52359036

s	$F(s)$	s	$F(s)$	s	$F(s)$	s	$F(s)$	s	$F(s)$
3	680	15	77540544	27	24463138336	39	88757487936	51	9748102
4	3060	16	145284325	28	33079985068	40	73721997284	52	1343342
5	11628	17	264439921	29	43405123242	41	57447140400	53	126700
6	38760	18	468283120	30	55204143800	42	41700857614	54	7282
7	116280	19	807550010	31	67970322498	43	27958028594	55	210
8	319770	20	1356808058	32	80902850743	44	17132134736	56	2
9	817190	21	2221351570	33	92936928305	45	9472716396		
10	1961256	22	3543440716	34	102839910030	46	4651580804		
11	4457400	23	5505931806	35	109374995290	47	1989274794		
S ₁₅ =15!=1307674368000									

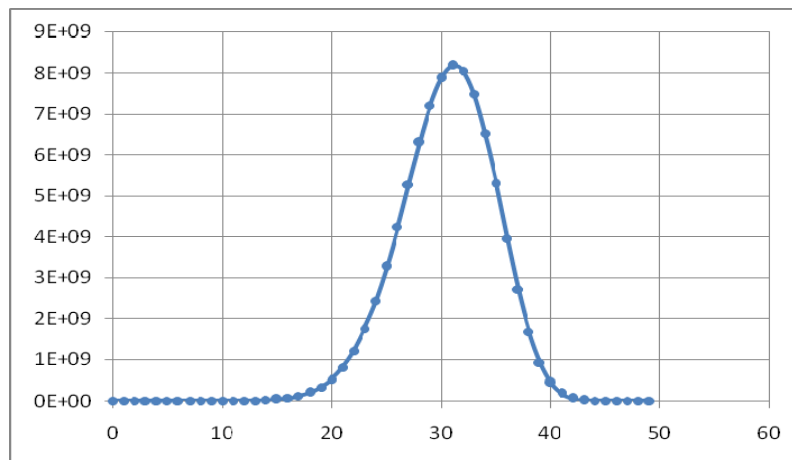
Рис. 1. График функции роста группы S_{14}

Fig. 1. Graph of group growth function

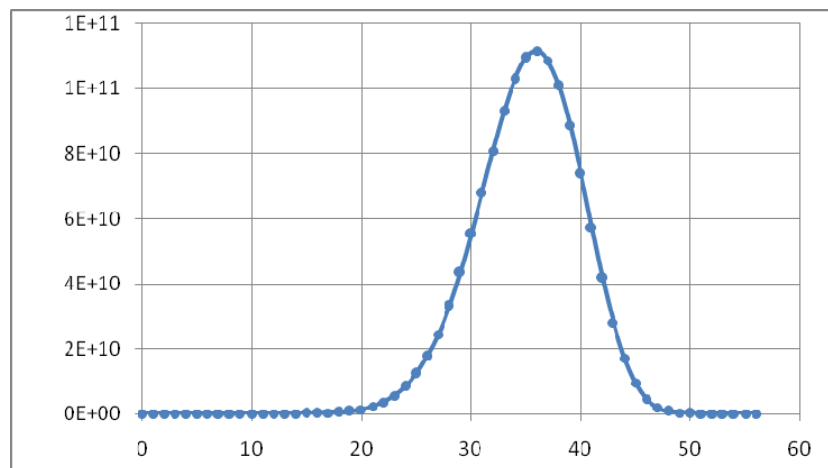
Рис. 2. График функции роста группы S_{15}

Fig. 2. Graph of group growth function

Заключение. Применение высокопроизводительных вычислений позволило продвинуться в изучении свойств MBS_n -графов. Несмотря на это, представить аналитическое решение для произвольного n на сегодняшний день не представляется возможным.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Красноярского края в рамках научного проекта № 17-47-240318.

Acknowledgments. The reported study was funded by RFBR and the government of Krasnoyarsk region according to the research project № 17-47-240318.

Библиографические ссылки

1. Akers S., Krishnamurthy B. A group theoretic model for symmetric interconnection networks // *Proceedings of the International Conference on Parallel Processing*. 1986. Pp. 216–223.
2. Schibell S., Stafford R. Processor interconnection networks and Cayley graphs // *Discrete Applied Mathematics*. 1992. Vol. 40. P. 337–357.
3. Cooperman G., Finkelstein L. New methods for using Cayley graphs in interconnection networks // *Discrete Applied Mathematics*. 1992. Vol. 37. P. 95–118.
4. Lakshmivarahan S., Jho J., Dhall S. Symmetry in interconnection networks based on Cayley graphs of permutation groups: A survey // *Parallel Computing*. 1993. Vol. 19. P. 361–407.
5. Heydemann M. Cayley graphs and interconnection networks, in *Graph symmetry: algebraic methods and applications* / Ed. Hahnand Sabidussi. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1997. P. 167–226.
6. Xu J. *Topological Structure and Analysis of Interconnection Networks*. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 2001. 352 p.
7. Parhami B. Swapped interconnection networks: Topological, performance, and robustness attributes // *Journal of Parallel and Distributed Computing*. 2005. Vol. 65. P. 1443–1452.
8. Computing the diameter of 17-pancake graphs using a PC cluster / S. Asai [et al.] // *LNSC*. 2006. Vol. 4128. P. 1114–1124.
9. Chen B., Xiao W., Parhami B. Internode distance and optimal routing in a class of alternating group networks // *IEEE Transactionson Computers*. 2006. Vol. 55. P. 1645–1648.
10. Wang L., Tang K. The Cayley Graph implementation in TinyOS for dense wireless sensor networks // *Proc. of the 6th Wireless Telecommunications Symposium*. 2007.
11. Efficient Routing in Data Center with Underlying Cayley Graph / M. Camelo [et al.] // *Proceedings of the 5th Workshop on Complex Networks CompleNet*. 2014. P. 189–197.
12. Кузнецов А. А., Кузнецова А. С. Параллельный алгоритм для исследования графов Кэли групп подстановок // *Вестник СибГАУ*. 2014. № 1(53). С. 34–39.
13. Even S., Goldreich O. The Minimum Length Generator Sequence is NP-Hard // *Journal of Algorithms*. 1981. Vol. 2. P. 311–313.
14. Кузнецов А. А., Кузнецова А. С. О взаимосвязи функций роста в симметрических группах с задачами комбинаторной оптимизации // *Вестник СибГАУ*. 2012. № 6(46). С. 93–97.
15. Кузнецов А. А. Об одном алгоритме вычисления функций роста в конечных двупорожденных группах периода пять // *Прикладная дискретная математика*. 2016. № 3(33). С. 116–125.

References

1. Akers S., Krishnamurthy B. A group theoretic model for symmetric interconnection networks. *Proceedings of the International Conference on Parallel Processing*, 1986, P. 216–223.
2. Schibell S., Stafford R. Processor interconnection networks and Cayley graphs. *Discrete Applied Mathematics*. 1992, Vol. 40, P. 337–357.
3. Cooperman G., Finkelstein L. New methods for using Cayley graphs in interconnection networks. *Discrete Applied Mathematics*. 1992, Vol. 37, P. 95–118.
4. Lakshmivarahan S., Jho J., Dhall S. Symmetry in interconnection networks based on Cayley graphs of permutation groups: A survey. *Parallel Computing*. 1993, Vol. 19, P. 361–407.
5. Heydemann M. *Cayley graphs and interconnection networks*, in *Graph symmetry: algebraic methods and applications*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 1997, P. 167–226.
6. Xu J. *Topological Structure and Analysis of Interconnection Networks*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001, 352 p.
7. Parhami B. Swapped interconnection networks: Topological, performance, and robustness attributes. *Journal of Parallel and Distributed Computing*. 2005, Vol. 65, P. 1443–1452.
8. Asai S., Kounoike, Shinano Y., Kaneko K. Computing the diameter of 17-pancake graphs using a PC cluster. *LNSC*. 2006, Vol. 4128, P. 1114–1124.
9. Chen B., Xiao W., Parhami B. Internode distance and optimal routing in a class of alternating group networks. *IEEE Transactionson Computers*. 2006, Vol. 55, P. 1645–1648.
10. Wang L., Tang K. The Cayley Graph implementation in TinyOS for dense wireless sensor networks. *Proc. of the 6th Wireless Telecommunications Symposium*, 2007.
11. Camelo M., Papadimitriou D., Fabrega L., Vila P. Efficient Routing in Data Center with Underlying Cayley Graph. *Proceedings of the 5th Workshop on Complex Networks CompleNet*. 2014, P. 189–197.
12. Kuznetsov A. A., Kuznetsova A. S. [A parallel algorithm for study of the Cayley graphs of permutation groups]. *Vestnik SibGAU*. 2014, No. 1(53), P. 34–39 (In Russ.).
13. Even S., Goldreich O. The Minimum Length Generator Sequence is NP-Hard. *Journal of Algorithms*. 1981, Vol. 2, P. 311–313.
14. Kuznetsov A. A., Kuznetsova A. S. [Relation between growth functions insymmetric groups and tasks of combinatorial optimization]. *Vestnik SibGAU*. 2012, No. 6(46), P. 93–97 (In Russ.).
15. Kuznetsov A. A. [An algorithm of computation of the growth functions in finite two-generated groups of exponent five]. *Prikladnaya Diskretnaya Matematika*, 2016, No. 3(33), P. 116–125 (In Russ.).

TO GEOSTATIONARY COLLOCATION PROBLEM

A. G. Kuprin^{1*}, A. V. Medvedev²¹JSC “Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems”
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: kprn@mail.ru

This article is about geostationary collocation problem which means problem of cooperative station retention. As part of this task it is assumed that different control centers don't exchange information about kinematic parameter's vectors and maneuvers. So there is full information and control possibility for one collocation member only. Sets of kinematic parameter vectors are available for the other collocation members. This situation corresponds to lack of a priority information conditions, so there is a nonparametric uncertainty situation because due to absence of information on parametric control law which is used to choose maneuvers for other collocation members. Modern collocation theory doesn't allow to avoid collision and process station retention in this condition. Synthesis of nonparametric regulator is in contemplation to solve this problem. First task of this regulator is estimation of previous maneuvers by processing kinematic parameter vectors sets. Second task is estimation of coordinates for every collocation member. Finally, nonparametric regulator must synthesize control which allows to process station retention and collocation. Suggested algorithm belongs to nonparametric class, so it is not necessary to know parametric form of controlling law. It is based on modification of Nadaraya-Watson nonparametric estimation.

The geostationary movement model including main perturbations, and most common collocation approaches are suggested. Nonparametric control algorithm is proposed.

Keywords: nonparametrics, geostationary spacecraft, collocation.

О ЗАДАЧЕ КОЛЛОКАЦИИ ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ

А. Г. Куприн^{1*}, А. В. Медведев²¹АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Российская Федерация, 662972, г. Железнодорожный Красноярского края, ул. Ленина, 52²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: kprn@mail.ru

Рассмотрена задача коллокации, т. е. задача совместного удержания космических аппаратов. В рамках данной задачи предполагается, что космические аппараты управляются из разных центров управления полетами, а обмен информацией, в частности о векторах кинематических параметров и планах коррекций, отсутствует. Таким образом, предполагается наличие полной информации и возможность управления лишь для одного из космических аппаратов, участвующих в коллокации, в то время как для других доступна лишь выборка векторов кинематических параметров, полученных на предшествующие моменты времени. Данная ситуация соответствует условиям недостатка априорной информации, а значит, и о всей системе, т. е. непараметрической неопределенности, так как неизвестен принцип, согласно которому из всех возможных планов коррекций выбирается план, закладываемый на не управляемые нами космические аппараты. В таких условиях современная теория управления космическими аппаратами не может обеспечить управление, гарантирующее отсутствие столкновений и выполнение задачи удержания космического аппарата. Для решения этой задачи предполагается синтез непараметрического регулятора. Первой задачей этого регулятора является оценка предыдущих планов коррекций на основе выборки начальных условий за определенный период времени. Второй задачей является оценка последующего положения космического аппарата на основе выборки коррекций, полученной на предыдущем шаге. Наконец, на основе информации о будущих коррекциях регулятор должен синтезировать управление, обеспечивающее минимальное безопасное расстояние между космическими аппаратами, а также решение задачи удержания. Алгоритм для решения данной задачи относится к классу непараметрических, т. е. для реализации алгоритма не требуется знания параметрического вида закона

управления объектом. За основу взята оценка посредством ядерного сглаживания, т. е. модификация непараметрической оценки регрессии типа Надарая–Ватсона.

Приведены описание модели движения геостационарного космического аппарата, основные возмущающие воздействия, основные подходы к коллокации, а также основные методы осуществления коллокации на практике. Рассмотрен алгоритм, позволяющий получать управление в условиях непараметрической неопределенности.

Ключевые слова: непараметрика, геостационарный космический аппарат, коллокация.

Introduction. The task of a collocation, i. e. the task of cooperative station keeping, is rather new task of ballistics which relevance is connected with the increase of spacecrafts (SC) number located on the geostationary orbit.

Geostationary orbit is a circle equatorial orbit on which in case of movement the vector of angular orbital speed of the satellite is equal and matches the vector of angular speed of the Earth around own axis rotation. The sidereal period of such SC equals a star day that is 86164 sec., while the eccentricity and inclination of the orbit equal zero [1]. Thus, in the absence of the perturbing influences, SC remains fixed over a standing point.

Satellites in a stationary orbit have gained the widest spread owing to advantages, such as:

1. Essential simplification of earth-satellite communication stations equipment due to uselessness of complicated tracking systems in antennas, to switch between satellites during the session etc.

2. Possibility of round-the-clock continuous service by one satellite up to 42 % of the land surface at the expense of rather big orbit height.

3. Quality support of radio communication owing to signals level persistence on the inputs of receivers and absence of the Doppler frequency deviation.

4. Ability to easily contact with the satellite at any time for onboard systems state monitoring, flight control by means of limited means (up to one single means).

Geostationary artificial Earth satellites are used in radio communication, television, meteorology, airplanes traffic control, relaying data from the satellites moving on low orbits, etc. [2]

In practice under the influence of perturbing forces orbit parameters deviate from geostationary ones, therefore instead of a geostationary orbit quasi-geostationary orbit, i. e. orbit with parameters rather close to geostationary is used. For SC maintenance in the geostationary orbit (GSO) it is necessary to permanently solve the problem of station keeping parameters of the orbit in the required range. This task is well studied and described, for example, in [1].

Due to the uniqueness of the geostationary orbit and growth of SC number placed on it, the task of control in collocation conditions acquires special relevance.

Under collocation should be understood a situation when retention boundaries on the longitude of two and more SC are crossed which can cause collisions. Let's call SC which are in collocation conditions members of collocation. Now methods of SC control for this case are developed and described if all members are controlled from one mission control center (MCC), or actions of MCC are coordinated [3]. However, for those cases, when it is impossible, the task stops being trivial.

The essence of control is as follows. Supposing there are several geostationary SC with the crossed retention areas, controlled from different MCC. Without loss of generality it will be read that there are two members of collocation as the algorithms, received under this assumption, can be extended to the general case by repetition for each couple of SC.

Only first SC serves as an object under control. Its physical characteristics are known, there is a selection of its kinematic parameters vectors (VKP) in the previous time points and realized correction plans. Information exchange between MCC is not available, so the position information of the second SC arrives with gaps. Physical characteristics of the second SC are known approximately, its corrections plans are unknown. It is necessary to provide such control of our SC, so that, firstly – to carry out the retention task, i. e. not to allow escape of longitude values, eccentricity and inclination from some set in advance range, secondly – so that the inter-satellite distance was more than a minimum safe distance.

The task of SC control can be reformulated as follows. It is necessary to find such a correction plan, appearing in the controlling mode that the Kepler's orbit elements, received while submission on SC, meet the following criteria:

$$\begin{aligned}\Delta R &> R_{\min}, \\ e_1 &\approx 0, \\ i_1 &\approx 0, \\ T_1 &\approx T_3,\end{aligned}$$

where ΔR – geometrical distance between satellites; e_1 – eccentricity of “our” SC; i_1 – declination of “our” SC; T_1 – sidereal period of “our” SC; T_3 – sidereal day.

Correction plan is the physical embodiment of control which starts engines in specified time point and with the specified duration. Thus, functioning as $f(\lambda_0, T_0, e_0, i_0, v_0, u_0, \bar{\alpha}, \tau, \bar{\mu})$, where λ_0, T_0, e_0, i_0 – longitude, period, eccentricity and inclination of S at the start of correction respectively which are responsible for the previous system state, v_0 and u_0 – true anomaly and S latitude argument at the start of correction – the beginnings of correction which are responsible for the moment; τ – correction duration; $\bar{\alpha}$ – vector of direction cosines of correction thrusters (CT) angles. As engines are tightly fixed at the assembly stage of S – the angles can be accepted invariable for each CT. τ – correction duration; $\bar{\mu}$ – vector of uncontrollable, but observed exposure. It includes disturbance input, such as disturbing geo-potential, Moon and the Sun gravitation, pressure of solar radiation and position of uncontrollable SC as well.

Geostationary spacecraft station keeping. Let's consider the collocation task as the task of automatic control in nonparametric uncertainty conditions, i. e. in conditions when there is no information about parametric control

law. This statement differs from the classical parametric problem definition of control described in [4]. The given problem definition is in many respects similar to one described in [5], assuming the dual control of an object, similar to [6]. At the same time with acquiring posteriori knowledge about the object, training of regulator is suggested, so the estimated algorithm can be referred to trainee class [7]. The control diagram is similar to the one suggested by A. A. Feldbaum in [8]. In this case the system is considered as “a black box” which is enveloped by the second circuit representing the regulator synthesizing control based on the previous selective values of inputs and outputs. The system will consist of two objects: first – controlled SC, and second – uncontrollable SC. As coordination between MCC is not available, the second SC will cope only with proceeding from retention requirements. For the description of disturbed movement of SC Lagrange principle according to which the disturbed movement of the satellite happens on the orbit, elements of which change over. It means that in each time point the disturbed orbit matches some orbit having common radius vector and velocity vector. Such orbits are called osculating orbits, orbit elements are osculating elements [9].

To describe the evolution of osculating elements under the influence of the disturbing forces introduced is the STW orbiting coordinate system where the ST plane matches the orbit plane, axis T is directed towards movement, axis S is perpendicular to it, and axis W adds system to right [10]. In this coordinate system, generally, evolution of elements is described by the following system of non-linear differential equations [1]:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\Omega}{dt} &= \frac{r}{\sqrt{\mu p}} \frac{\sin u}{\sin i} \sum_{j=0}^4 \Delta g_{jw}; \\
 \frac{di}{dt} &= \frac{r}{\sqrt{\mu p}} \cos u \sum_{j=0}^4 \Delta g_{jw}; \\
 \frac{dp}{dt} &= 2r \sqrt{\frac{p}{\mu}} \sum_{j=0}^4 \Delta g_{jT}; \\
 \frac{dq}{dt} &= \sqrt{\frac{p}{\mu}} \left(\sin u \sum_{j=0}^4 \Delta g_{jS} + \right. \\
 &+ \left[\left(1 + \frac{r}{p} \right) \cos u + \frac{r}{p} q \right] \sum_{j=0}^4 \Delta g_{jT} + \\
 &+ \frac{r}{p} k \sin(u) \operatorname{ctg}(i) \sum_{j=0}^4 \Delta g_{jW} \Big); \\
 \frac{dk}{dt} &= \sqrt{\frac{p}{\mu}} \left(-\cos u \sum_{j=0}^4 \Delta g_{jS} + \right. \\
 &+ \left[\left(1 + \frac{r}{p} \right) \sin u + \frac{r}{p} k \right] \sum_{j=0}^4 \Delta g_{jT} - \\
 &- \frac{r}{p} q \sin(u) \operatorname{ctg}(i) \sum_{j=0}^4 \Delta g_{jW} \Big); \\
 \frac{du}{dt} &= \frac{\sqrt{\mu p}}{r^2} \left(1 - \frac{r^3}{\mu p} \operatorname{ctg}(i) \sin(u) \sum_{j=0}^4 \Delta g_{jW} \right),
 \end{aligned} \tag{1}$$

where i – orbit inclination (angle between equatorial plane and orbital plane); u – latitude argument of S (angle counted from the orbital plane directing from Earth center on the ascending node until the current radius vector of the satellite in the direction of its movement on the orbit); p – focal orbital parameter; e – orbit eccentricity; μ – gravitational parameter of Earth, constant $\mu = 398600.440 \text{ km}^3/\text{s}^2$; ω – a perigee latitude argument (angular distance of orbital perigee counted in the orbital plane directing from Earth center on the ascending node towards satellite movement),

$$q = e \cos \omega; \quad k = e \sin \omega;$$

$$r = \frac{p}{1 + q \cos u + k \sin u},$$

$\Delta g_{iS}, \Delta g_{iT}, \Delta g_{iW}$ – perturbing accelerations.

The given system has no analytical solution, however, can be solved using numerical method, for example, or Adams's method [11].

The main disturbing forces are:

1. The disturbing gravitational capacity of Earth.

This influence is connected with the fact that Earth is not a full-sphere with uniform distribution of masses. Because of this SC has acceleration towards one of the points of stable equilibrium (located around longitudes 75.1 el. and 105.3 wl.) and in the absence of adjusting maneuvers starts fluctuation under the law of pendulum within the period a little bit over two years [2]. Influence of the Earth disturbing gravitational capacity can be determined by the following formula [9]:

$$R_{\oplus} = \frac{\mu}{r} \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a_E}{r} \right)^n [C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda] P_{nm}(\sin \varphi),$$

n – Number of harmonics; in practice 8 harmonics are commonly used μ – the Earth's gravitation constant; a_E – the big Earth's semi-axis; r – geocentric distance of the satellite; φ, λ – latitude and longitude of the satellite respectively; C_{nm}, S_{nm} – the dimensionless coefficients characterizing outside gravitational field of Earth $P_{nm}(\sin \varphi)$ – Legendre functions. They are of two types: with Legendre polynomials, with $0 < m \leq n$ – associated Legendre functions.

With $m = 0$ Legendre functions are as follows

$$P_{n,0}(\sin \varphi) = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n (\sin^2(\varphi) - 1)^n}{d(\sin \varphi)^n}.$$

With $0 < m \leq n$

$$P_{nm}(\sin \varphi) = (1 - \sin^2 \varphi)^{m/2} \frac{d^m P_{n0}(\sin \varphi)}{d(\sin \varphi)^m}.$$

2. The Moon and the Sun gravitation attraction.

For the SC based on MCC, it leads to decline rise from 0 approximately to 14.6° in about 27 years and the fall to zero during the following 27 years, etc. [2].

Influence of the Moon and the Sun gravitation can be calculated by the following formula [9]

$$R_i = \mu_i \left(\frac{1}{\Delta_i} - \frac{r}{r_i^2} \cos \Psi_i \right),$$

i – the index accepting value 1 for the Moon, 2 – for the Sun; μ_i – gravitational parameter of the appropriate celestial body; $\mu_{\text{J}} = 4902.778 \text{ км}^3/\text{с}^2$; $\mu_{\text{C}} = 1.32712438e + 11 \text{ км}^3/\text{с}^2$; r – geocentric distance to the satellite; r_i – geocentric distance to the Sun and the Moon; Δi – distance between the satellite and a celestial body; Ψ_i – angle between the geocentric directions towards the satellite and celestial body,

or

$$R_i = \mu_i \left(\frac{1}{\Delta_i} - \frac{xx_i + yy_i + zz_i}{\Delta_i^3} \right),$$

where x, y, z – SC coordinates; ax_i, y_i, z_i – Moon and Sun coordinates respectively.

In this case

$$\Delta \bar{g}_j = \mu_i \left(\frac{1}{\Delta_i^3} (\bar{X} - \bar{X}_i) - \frac{1}{r_i^3} \bar{X}_i \right),$$

where $\bar{X}$ – vector of SC coordinates; $\bar{X}_i$ – vector of the Moon and the Sun coordinates respectively [12].

3. Direct light pressure.

Under the influence of light pressure the SC's orbit expands perpendicularly to the direction towards the Sun which means that the eccentricity of an orbit does not remain invariable [2].

Influence of pressure of solar radiation can be calculated by the following formula [6]

$$F = \chi \frac{\bar{S}}{m} \frac{S_s (1+k)}{c} \cos \alpha \left(\frac{r_s}{\Delta} \right)^2,$$

where $\bar{S}$ – satellite cross-section area in the direction towards the Sun; m – satellite mass; S_s – average value of solar constant; k – satellite reflection coefficient; c – light velocity; α – descent angle of sunshine on the surface; χ – shadow function, its values lie on the interval [0;1],

or

$$F = kq \frac{\bar{S}}{m} \left(\frac{a_s}{\Delta_s} \right)^2 \frac{\bar{x}_s - \bar{x}}{\Delta_s},$$

where $\bar{x}$ – geocentric vector of the satellite position; $\bar{x}_s$ – geocentric vector of the Sun position; Δ_s – inter-distance between the satellite and the Sun; a_s – big semi-axis of Earth's orbit; k – parameter, characterizing the reflection features of the satellite surface ($k = 1$ – mirror reflection, under $k = 1.44$ – diffusion); q – the sun constant, $q = 4.65 \cdot 10^5 \text{ дин}/\text{см}^2$.

Control is exercised by means of switching on the correction thrusters (CT) at a given time of t_0 c with duration $\Delta\tau$. Depending on the thrust direction, it is possible to select two types of retention corrections

1. With use of thrust in the transversal direction.

Transversal thrust is used for correction of the period and orbit eccentricity.

The period of SC changes according to the law:

$$T = T_0 \left(1 + 3 \sqrt{\frac{a_0}{\mu}} \Delta g_{4T} \Delta\tau \right),$$

where T – CS period, sec.; T_0 – the period at the beginning of correction, sec.; a_0 – big semi-axis at the beginning of correction, km; Δg_{4T} – CM thrust in transversal direction; $\Delta\tau$ – correction period, sec.

Given that the speed of the SC's drift changes according to formula

$$\Delta \dot{\lambda} = \frac{6\pi a^2 \Delta g_{4T} \Delta\tau}{240\mu},$$

where $\Delta \dot{\lambda}$ – SC's drift speed, deg/day; μ – Earth's gravitation constant.

Given that the change of longitude during the correction can be calculated by formula

$$\Delta \lambda = \frac{\mu}{4a^2 \Delta g_{4T}} \left(1 - \left(1 - \sqrt{\frac{a}{\mu}} \Delta g_{4T} \Delta\tau \right)^4 \right) - \omega_3 \Delta\tau,$$

where ω_3 – angular speed of the Earth rotation.

The eccentricity of SC changes under the following law

$$e = \sqrt{e_0^2 + 4Ae_0 \cos \left(v_0 + \frac{\pi}{T_{\text{cp}}} \Delta\tau \right) \sin \frac{\pi}{T_{\text{cp}}} \Delta\tau + 4A^2 \sin^2 \frac{\pi}{T_{\text{cp}}} \Delta\tau},$$

where

$$A = 2\Delta g_{4T} \frac{\sqrt{a_{\text{cp}}^3 p_0}}{\mu},$$

a_{cp} – the average value of the big semi-axis during correction,

$$a_{\text{cp}} = a \left(1 + \sqrt{\frac{a_0}{\mu}} \Delta g_{4T} \Delta\tau \right);$$

T_{cp} – average period during correction,

$$T_{\text{cp}} = 2\pi \sqrt{\frac{a_{\text{cp}}}{\mu}};$$

v_0 – the true anomaly at the beginning of correction.

Thus, eccentricity shift depends on the true anomaly at the beginning of correction.

The maximum reduction of eccentricity is reached under

$v_0 = \frac{\pi}{2}$ given that $\Delta g_{4T} > 0$, or $v_0 = \frac{3\pi}{2}$ under $\Delta g_{4T} < 0$ и continuous during the half of the period. Thus, eccentricity corrections should be applied so that the middle of correction falls on the points, where $v_0 = \pi$ under $\Delta g_{4T} > 0$ ($v_0 = 2\pi$ given $\Delta g_{4T} < 0$), correction duration shall not exceed 12 hours.

2. Applying binormal thrust.

Binormal thrust is used for correction inclination. Inclination herewith shifts according to the formula

$$i = i_0 + \frac{a_0^2}{\mu} \Delta g_{4W} (\sin(u_0 + n_0 \Delta\tau) - \sin u_0),$$

where i_0 – initial inclination; i – inclination by the end of correction; Δg_{4W} – binormal thrust component; u_0 – latitude argument value at the beginning of correction; n_0 – average S speed at the beginning of correction:

$$n_0 = \sqrt{\frac{\mu}{a^3}}.$$

Similar to eccentricity, inclination shift depends on the beginning of correction. Given $\Delta g_{4W} > 0$ middle of correction shall fall on the point where it shall last no more than 12 hours. For $\Delta g_{4W} < 0$ middle of correction shall fall on the point where $u = 2\pi$.

Binormal thrust influence neither eccentricity, nor SC period, its speed of drift and longitude.

On real SC, CT are usually located so that both transversal, and binormal thrusts are not zero. Thus, corrections allow to change all three parameters. Correction start time is a compromise between requirements to eccentricity correction and correction of the inclination. According to the same requirements the number of correction motors (CT) is selected, therefore the direction of transversal and binormal thrust.

Collocation. Let's consider the main collocation principles.

Geostationary Earth satellites are placed only in a circular equatorial orbit with the radius (from Earth center) about 42164.2 km. These conditions limit the quantity of longitudinal slots, areas of longitude retention. In 1971 the World Administrative radio conference (WARC) recognized the geostationary orbit as a limited natural resource. At the same time the increase in the number of Earth geostationary satellites causes the boundaries on longitude to get narrower and also for certain S can overlap or even coincide. Supposing we call these conditions collocation conditions, while S which are in these conditions can be called members of collocation. Boundaries longitudinally crossing may cause the risk of collision between members of collocation, in particular due to enormous solar panels used in the modern missions.

Initially distribution of longitudes was applied only with the purpose of avoiding interference between adjacent SC which used identical radio frequencies, whereas the collision risk was estimated as insignificant. Those assumptions were explained by typical boundaries having more than 100 km on the longitude and latitude and, at least, half in the radial direction. Only afterwards, with the growth of SC placed on a geostationary orbit, some space agencies realized that the potential risk of physical collision is higher than it was supposed. However, collisions of 2 operating S has never been reported, a probable cause of which was that there was no request to take measures from WARC [3].

The risk of collisions issue strongly varies among the space agencies. Some neglect it, while others strive for its minimization. In case when all S s are controlled from the same MCC, collocation methods become quite obvious, and are described, for example in [3]. However, in case there are S s which are controlled from a different MCC, the task becomes complicated with the need of constant information exchange between all involved MCCs and also constant coordination of corrections.

1. Currently 4 approaches to collocation choice of the relevant one depends on the number of the S s and MCCs involved, accuracy of orbit spotting, size of boundaries longitudinally and attitudinally, etc.

2. Without avoiding collisions.

This approach can be employed during the short time frame in case of few members of collocation.

3. Not coordinated collocation.

Employing this method SC's are controlled independently, however before and after each correction the distance between all members of collocation is evaluated. Corrections are planned so that to keep some "safe" distance. Maneuvers of collisions avoidance are entered in the plan of corrections.

Need of assessment of SC orbits and information exchange between MCC force to make corrections only for one SC co-instantaneously and also to make a break between correction plans on any S at least 1,5–2 days.

4. Collocation by means of separation.

In this case different longitudinal subareas, eccentricity vectors and declination of initial boundaries correspond to different satellites. Theoretically, given this control without information exchange between participants of collocation is possible.

The weak point of this approach is boundaries' "narrowing" in all respects as there is retention of the SC parameters in narrower boundaries requiring additional fuel. Also these subareas shall consider not only requirements of this approach, but also various errors of control and orbit spotting which make this method inapplicable if the initial boundaries are too narrow.

5. Coordinated collocation.

In this case all members of collocation are built according to system where their daily parameter oscillations of the orbit and drift speed are identical. Corrections for all SC are carried out simultaneously.

This approach requires constant information exchange and control error correction to save the constructed system, however, maneuvers of deviation are required only in case of force major [3].

Depending on selected orbit parameters providing the collocation, 6 modes of corrections partition can be identified:

a) Longitudinally.

When using this mode a specific longitudinal area corresponds to every SC. It becomes possible only if the integrated boundaries are rather wide and the number of SC is not enough. This mode is not a real collocation as each SC is retained in its own boundaries irrespective of remaining ones.

b) Longitudinal separation during the drift cycle (in phase paths).

This method also assumes longitudinal separation, but areas partially overlap and every single one is engaged with different members of collocation at the different moments of the retention cycle. It is the example of the coordinated retention corresponding to method 4, given above. Corrections of longitude shall be carried out for all S s in the same day, so will change under the same law simultaneously. Eccentricities do not require comparison while they are rather small so it will not cause big longitudinal oscillations, but this mode can be integrated with the third one, described below. This mode best fits S in case of minor pressure from solar radiation.

c) Longitudinal separation under oscillations caused by eccentricity.

In this case longitudinal boundaries also break into several partially crossed areas, but they deal with different members of collocation at the different times of sidereal days due to longitudinal oscillations caused by eccentricity. Therefore, this method can be applied to S s with high, but close to identical pressure of solar radiation. Oscillation phase shall be identical to all members. Corrections for the members of collocation shall be carried out practically simultaneously, but some deviations are allowed to correct errors after previous retaining corrections.

d) Plane separation on eccentricity.

In this case each S uses all available longitudinal area, while for collocation the difference of target eccentricity vectors is applied. Orbital planes can match or not, so each SC can make inclination corrections, regardless remaining ones.

This method is best applied given pressure of solar radiation is high. The principal disadvantage of this method is high error sensitivity to SC's speed drift. Therefore this method is usually combined with the one described below.

e) Combined placement by inclination and eccentricity in the meridian plane.

This mode is similar to the previous one, except that for retention area separation not only eccentricity vector is used, but also an inclination vector. The only, but important advantage of this mode is independence from longitudinal difference which eliminates lack of error sensitivity by longitude and drift speed.

Therefore, this collocation method is preferable for missions with low or medium accuracy of tracking systems. However, the shortcoming is that inclination corrections shall be coordinated between members, which can be difficult if they have different correction restrictions

f) Separation by all three parameters.

In this mode for each SC the longitudinal subarea, eccentricity vector subarea and inclination vector subarea are selected. This mode is of minor practical interest as it does not give new collocation opportunities in comparison with previous modes.

From the aforesaid all modes of collocation assume essential coordination between all participating MCC, in particular, coordination of corrections and also creation of some system excluding collision risks. Corrections are carried either simultaneously, according to the system coordinated earlier, or successively after an SC orbit spotting. It shows essential disadvantage of modern approach to collocation as:

a) in case interaction between MCC for one or another reason is impossible, solution of the collocation task becomes difficult;

b) between corrections there are breaks for coordination of corrections with other MCC and other S orbits specifying which complicates the retention task;

b) many methods superimpose additional restrictions on longitudinal, eccentricity and declination retention area, and therefore attract additional fuel consumption.

One of the methods mostly applied in practice is longitudinal separation. The minimum safe distance between S (that is equivalent to longitudinal subarea) is selected proceeding from the error of S orbit determination. The main sources of errors in navigation measurements are: errors of an onboard scale formation; errors connected with poor knowledge of radio waves propagation conditions in the Earth atmosphere; errors of a customer's receiving equipment [13]. This distance normally equals 36–72 km while the shift along the orbit of the second S can reach 45 km a day.

Another method put into practice is a combined longitudinal, eccentricity and declination placement. In this case rated values of inclination and eccentricity vectors shall be delivered at the angle of 120°.

Nonparametric regulator. As an algorithm for the controller synthesis algorithms of nonparametric family are suggested. This class of algorithms is intended for operation in nonparametric uncertainty conditions [14], i. e. in conditions when there is no knowledge of parametric structure of the law describing an object. It corresponds to the case considered as the principle according to which one of the set of possible corrections plans is selected remains unknown. Assessment is made only basing on selection of inputs and outputs of an object.

For a dynamic system the control algorithm is modification of nonparametric assessment of regression like Nadaraya-Watson (nuclear smoothing) and is as follows [15]:

$$u_s^* = \frac{\sum_{i=1}^S u_i \prod_{j=1}^k \Phi\left(\frac{\mu_i^j - \mu_j^j}{C_\mu^j}\right) \prod_{j=1}^n \Phi\left(\frac{x_{i-1}^j - x_i^j}{C_{x-1}^j}\right) \prod_{j=1}^m \Phi\left(\frac{x_i^j - x_i^j}{C_x^j}\right)}{\sum_{i=1}^S \prod_{j=1}^k \Phi\left(\frac{\mu_i^j - \mu_j^j}{C_\mu^j}\right) \prod_{j=1}^n \Phi\left(\frac{x_{i-1}^j - x_i^j}{C_{x-1}^j}\right) \prod_{j=1}^m \Phi\left(\frac{x_i^j - x_i^j}{C_x^j}\right)}, \quad (2)$$

where $\{\bar{\mu}_i, u, y_i\}$ – selection of uncontrollable influences, inputs and outputs of an object respectively; S – range; k, n, m – vector length of uncontrollable influences μ , controls of u and output of an object x respectively; C_x, C_μ, C_{x-1} – blur coefficient; Φ – bell-shaped (nuclear) function.

To input parameters of an object u corrections with the following parameters arrive:

1. Start of correction. Usually is calculated as the number of seconds till a reference era, in particular till midnight 01.01.2000.

2. Transversal and binormal component of thrust (radial component can be neglected), km/c².

3. Correction period, sec.

Thus, vector length of inputs is equal to five.

μ uncontrollable influences include corrections to orbit parameters connected with influence of the Moon, the Sun, the perturbing geopotential and solar pressure.

Longitude of the second SC. As VKP are measured quite seldom, the predicted values are used.

Outputs include:

1. Orbital parameters of controlled SC. In total 6 independent orbital parameters are used. For example, it is possible to use those similar to the system of equations (1).

2. Inter-satellite distance, km.

Bell-shaped function is a function complying with the set of conditions [15].

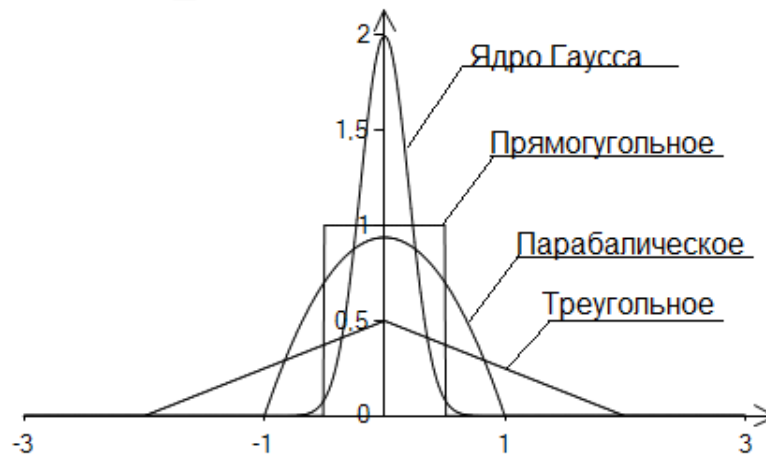
There is a huge number of bell-shaped functions, let's consider some of them (see figure).

1. Rectangular function:

$$F(t) = \begin{cases} 0, & \text{given } t < -0.5 \text{ or } t > 0.5; \\ 1, & \text{given } -0.5 < t < 0.5. \end{cases}$$

2. Triangular function:

$$F(t) = \begin{cases} 0.25t + 0.5, & \text{given } -2 < t \leq 0; \\ -0.25t + 0.5, & \text{given } 0 < t \leq 2; \\ 0, & \text{given } t < -2 \text{ and } t > 2. \end{cases}$$

Bell functions with $C_S = 1$ Колоколообразные функции при $C_S = 1$

3. Quadratic function:

$$F(t) = \begin{cases} \frac{15}{16}(1-t^2), & \text{given } t^2 \leq 1; \\ 0, & \text{given } t^2 > 1. \end{cases}$$

4. Gaussian kernel:

$$F(t) = \frac{1}{C_S \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t-t_i)^2}{2C_S^2}\right).$$

The choice of one of nonparametric functions depends only on what properties assessment shall have: for example, whether it shall be smooth, continuous etc. At the same time the model error depends on this choice a little. Therefore, the task comes only to a choice of blur coefficients values.

Thus, use of this controller allows monitoring the object in the conditions of nonparametric uncertainty which corresponds to the given case, where the principles, on which one of possible corrections plan sets for the second SC is selected, are unknown.

The algorithm (2) given above offers selection existence, so an object shall be initially available for the experiment, or to be manned briefly. If it is impossible, to control the object the retrieval step is applied Δu [5].

In this case the controlling algorithm is as follows

$$F_i = \prod_{j=1}^k \Phi\left(\frac{\mu_t^j - \mu_i^j}{C_\mu^j}\right) \prod_{j=1}^n \Phi\left(\frac{x_{t-1}^j - x_i^j}{C_{x-1}^j}\right) \times \\ \times \prod_{j=1}^m \Phi\left(\frac{x_t^j - x_i^j}{C_x^j}\right); \\ u_s^* = \frac{\sum_{i=1}^S u_i F_i}{\sum_{i=1}^S F_i} + \Delta u.$$

This step represents the control synthesized by some non-adaptive regulator capable of solving the problem of control at the initial stages, i. e. before selection accumulation. For example, for dynamic systems, as a retrieval

step the control synthesized by PID – regulator can be used. With growth of the amount of selection, influence of the retrieval step decreases, and those of nonparametric component – grows [5].

Conclusion. In summary, the task of geostationary SC control in collocation conditions in the absence of information exchange between MCC has been considered above. The existing controlling system of S in these conditions are described, showing that in the absence of coordination between MCC it does not work. The class of algorithms which can be applied in such situation, in particular, the algorithms based on nonparametric regression of assessment by means of bell-shaped functions is considered.

References

1. Chernyavsky G. M., Bartenev V. A., Malyshev V. A. *Upravlenie orbitoy geostatsionarnogo sputnika* [Geostationary spacecraft orbit control]. Moscow. Mashinostroyeniye Publ., 1984, 144 p.
2. Urlichich Yu. M. *Sovremennye tehnologii geostatsionarnih sputnikov* [Modern technologies for geostationary spacecrafts]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006, 271 p.
3. Soop E. M. Handbook of geostationary orbits. Norwell, Microcosm. Inc., 1994, 309 p.
4. Tsipkin Ya. Z. [Adaptation and learning for automatic systems]. *Avtomat i telemekh.* 1966, No. 1, P. 23–61 (In Russ.).
5. Medvedev A. V. [Theory of nonparametric systems. Control-I]. *Vestnik SibGAU.* 2013, No. 2(48), P. 57–63 (In Russ.).
6. Feldbaum A. A. [Theory of dual control I]. *Avtomat i telemekh.* 1960, Vol. 21, No. 9, P. 1240–1249 (In Russ.).
7. Voronov A. A. *Osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniya. Chast 3. Oprimalnie, mnogosvyaznye i adaptivnye sistemy* [Basic principles of automatic control. Part 3. Optimal multilinked and adaptive systems]. Leningrad, Energiya Publ., 1970, 328 p.
8. Feldbaum A. A. *Osnovy teorii optimalnyh sistem* [Basic principles of optimal system theory]. Moscow, Fizmat Publ., 1963, 553 p.

9. Antonovich K. M. *Ispolzovanie sputnikovyyh radio-navigatsionnyh sistem v geodezii* [Spacecraft radionavigation system using for geodesy]. Moscow, Kartgeotsent Publ., 205, 334 p.

10. Chernyavskiy G. M. Bartenev V. A. *Orbiti sputnikov svyazi* [Communication spacecraft orbits]. Moscow, Svyaz' Publ., 1978, 235 p.

11. Avduchev V. A. *Chislennoe modelirovanie orbit* [Computational simulation of orbits]. Tomsk, NTL Publ., 2010, 282 p.

12. Reshetnev M. F. *Upravlenie i navigatsiy iskustvennyh spytnikov Zemli na okoloekrugovyh orbitah* [Control and navigation for Earth spacecraft with semi round orbit]. Moscow, Mashinstroenie Publ., 1988, 333 p.

13. *Sputnikovie navigatsionnye sistemy* [Spacecraft navigation systems]. Moscow, Moscow aviation institute Publ., 2004, 338 p.

14. Medvedev A. V. *Neparametricheskie sistemy adaptatsii* [Nonparametrical adaptation systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983, 176 p.

15. Medvedev A. V. *Osnovi teorii adaptivnyh sistem* [Basic principles of adaptive system theory]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2015, 526 p.

Библиографические ссылки

1. Чернявский Г. М., Бартенев В. А., Малышев В. А. Управление орбитой геостационарного спутника. М. : Машиностроение, 1984. 144 с.

2. Современные технологии навигации геостационарных спутников / Ю. М. Урличич [и др.]. М. : Физматлит, 2006. 271 с.

3. Soop E. M. Handbook of geostationary orbits. Norwell : Microcosm. Inc., 1994. 309 p.

4. Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах // Автомат. и телемех. 1966. № 1. С. 23–61.

5. Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Управление – I // Вестник СибГАУ. 2013. № 2(48). С. 57–63.

6. Фельдбаум А. А. Теория дуального управления. I // Автомат. и телемех. 1960. Т. 21, № 9. С. 1240–1249.

7. Воронов А. А. Основы теории автоматического управления. Ч. 3. Оптимальные, многосвязные и адаптивные системы. 2-е изд., перер. Л. : Энергия. Ленингр. отд-ние, 1970. С. 328.

8. Фельдбаум А. А. Основы теории оптимальных автоматических систем. М. : Физматгиз, 1963. 553 с.

9. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. М. : ФГУП «Картгеоцентр», 2005. 334 с. : ил.

10. Чернявский Г. М., Бартенев В. А. Орбиты спутников связи. М. : Связь, 1978. 235 с.

11. Авдюшев В. А. Численное моделирование орбит. Томск : Изд-во НТЛ, 2010. 282 с.

12. Управление и навигация искусственных спутников Земли на околокруговых орбитах / М. Ф. Решетнев [и др.]. М. : Машиностроение, 1988. 336 с.

13. Спутниковые навигационные системы. М. : Моск. авиац. ин-т, 2004. 338 с.

14. Медведев А. В. Непараметрические системы адаптации. Новосибирск : Наука, 1983. 176 с.

15. Медведев А. В. Основы теории адаптивных систем / Сиб гос. аэрокосмич ун-т. Красноярск, 2015. 526 с.

© Kuprin A. G., Medvedev A. V., 2017

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРЕДМЕТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ
ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ
КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

Л. Ф. Ноженкова*, О. С. Исаева

Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 44
*E-mail: expert@icm.krasn.ru

Рассмотрено создание предметно-ориентированной среды имитационного моделирования бортовой аппаратуры космического аппарата. Разрабатываемая среда основывается на стандарте Simulation Model Portability (SMP), который определяет технологию достижения совместимости и переносимости имитационных моделей в рамках крупных имитационных проектов сложных программно-технических комплексов.

В мировой космической индустрии существует ряд разработок инфраструктур имитационного моделирования. Они используются в крупных технических проектах, для которых существенную роль играет возможность интегрировать и совместно использовать имитационные модели различного назначения, в том числе разных производителей.

Поддержка импортонезависимости российских космических разработок должна включать создание отечественных программных продуктов, основанных на стандартах Европейского космического агентства. Такие исследования позволят понять принципы организации комплексных проектов и их интеграции в международные исследования.

Разработана архитектура программного обеспечения, предложено разделение на программные подсистемы и описаны основные принципы их взаимодействия. Инфраструктура имитационного моделирования предназначена для поддержки работы конструкторов бортовой аппаратуры космических систем. Ее функции определены на основе анализа основных задач конструирования: поддержка проектирования бортовой аппаратуры, формирование и анализ конструкторских решений на различных этапах жизненного цикла производства космической техники.

Архитектура содержит все необходимые компоненты для обеспечения интегрируемости и переносимости имитационных моделей между системами имитационного моделирования, построенными по стандарту SMP. Разрабатываемое программное обеспечение расширяет подходы, заложенные в стандарте оригинальными методами информационно-графического и интеллектуального моделирования. Для наглядного построения моделей, задания их структуры и определения связей между элементами разработаны методы и программное обеспечение информационно-графического моделирования. Для задания методов функционирования моделей предлагается использовать condition-action rules. Разработаны специализированные инструменты формирования баз знаний, которые позволяют описать различные варианты поведения моделируемых объектов.

Публикация разработанных подходов и архитектуры программного обеспечения открывает возможности применения SMP другими исследователями в собственных разработках, а также показывает основные технологические моменты, необходимые для выполнения требований стандарта.

Ключевые слова: разработка проблемно-ориентированного программного обеспечения, инфраструктура имитационного моделирования, Simulation Model Portability standard, космический аппарат, бортовая аппаратура, архитектура программного обеспечения.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 3, P. 538–544

**DESIGNING THE PROBLEM-ORIENTED INFRASTRUCTURE FOR SIMULATION MODELING
OF SPACECRAFT ONBOARD EQUIPMENT**

L. F. Nozhenkova*, O. S. Isaeva

Institute of Computational Modelling SB RAS
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
*E-mail: expert@icm.krasn.ru

The authors develop a subject-oriented environment of the spacecraft onboard equipment simulation modeling. This environment is basing on the Simulation Model Portability standard (SMP), which determines the technology for compatibility and transferability of simulation models within big simulation projects of software-and-hardware complexes.

There is a number of simulation infrastructures in the world space industry. They are used in big technical projects where it is important to integrate simulation models of different purpose, including those of different manufacturers, and to use them together.

The support for the import-independence of Russian space developments should include the creation of domestic software products based on the standards of the European Space Agency. Such studies will make it possible to understand the principles of organization of complex projects and their integration into international research. We have designed a software architecture, proposed a division in software subsystems and described the main principles of their interaction. Simulation infrastructure is aimed to support the work of the space systems' onboard equipment designers. Its functions are determined by the basic tasks of the constructing: onboard equipment design support, generation and analysis of designer solutions at different stages of the space equipment production lifecycle.

The architecture contains all the necessary components to provide transferability and workability of simulation models in the simulation modeling systems built on the basis of the SMP Standard. Our software extends the approaches provided by the standard with the original methods of information-graphic and intellectual modeling.

The authors have developed the methods and software of information-and-graphic modeling for visual building of the models, setting their structure and determining the links between their elements. To specify the methods of functioning of models, the authors suggest using condition-action rules. Our special instruments of knowledge base creation allow describing different variants of the modeled object behavior.

The publication of the developed approaches and the software architecture opens up the possibilities of using SMP by other researchers in their own development, and also shows the main technological moments which are necessary to meet the requirements of the standard.

Keywords: developing problem-oriented software, simulation infrastructure, simulation model portability standard, spacecraft, onboard equipment, software architecture.

Введение. Координация исследований в области космического приборостроения требует создания унифицированных технологий имитационного моделирования бортовой аппаратуры космических аппаратов. Такие технологии должны основываться на применении международных стандартов, обеспечивающих переносимость и интегрируемость имитационных моделей бортовых устройств. В мировой практике для этих целей успешно используется стандарт Европейского космического агентства Simulation Model Portability (SMP2) [1; 2]. Для крупных имитационных проектов сложных программно-технических комплексов мировые лидеры космической отрасли развивают собственные инфраструктуры имитационного моделирования, основанные на SMP2. Инфраструктура имитационного моделирования представляет собой инструментальную среду, позволяющую создавать и интегрировать имитационные модели технических устройств. Стандарт SMP2 задает универсальные подходы к организации систем моделирования, обеспечению совместимости и переносимости имитационных моделей между различными имитационными окружениями. Однако за рамками стандарта остаются технологические аспекты построения инфраструктур. В то время как за рубежом ведутся интенсивные исследования в этом направлении, в нашей стране наблюдается значительное отставание. Научная значимость проведенного авторами исследования состоит в том, что полученные результаты позволяют существенно восполнить этот пробел. Разработанная технология построения архитектуры инфраструктуры имитационного моделирования, с одной стороны, удовлетворяет требованиям унификации, изложенным в стандарте SMP2, с другой стороны, расширяет возможности построения моделей за счет средств информационно-графического и интеллектуального моделирования.

К наиболее известным в мире инфраструктурам имитационного моделирования относятся SimTG – Astrium Satellites [3], SimSAT – European Space Agency [4], симулятор Европейского центра управления полетами SWARMSIM [5]. Инфраструктуры имитационного моделирования используются в крупных технических проектах, для которых существенную роль играет возможность интеграции и совместного использования имитационных моделей различного назначения. Применение стандарта SMP2 открывает широкие возможности для построения и использования сложных, многокомпонентных имитационных моделей [6; 7]. Интересный пример использования стандарта SMP был реализован в крупном научно-исследовательском проекте MERLIN [8], заключающемся в разработке спутников дистанционного зондирования для мониторинга парникового газа. Уникальность проекта заключается в интеграции имитационных моделей, разрабатываемых исследователями на четырех различных SMP-платформах имитационного моделирования. Применение SMP позволило объединить имитационные модели от Airbus, CNES и Thales Alenia Space, выполнив стандартизацию всех компонентов пространственной системы, сделать их более надежными, снизить затраты и оптимизировать график разработки.

Положительный опыт мировых исследований показывает актуальность развития технологий имитационного моделирования на основе стандарта SMP2. Для поддержки импортонезависимости российских космических разработок требуется проводить всесторонние исследования, направленные на создание отечественных технологий и инструментальных сред, поддерживающих методы переносимости и интегрируемости моделей. Такие исследования позволяют развивать принципы организации комплексных космических проектов и их интеграцию в международные исследования.

В статье предложена технология создания оригинальной инфраструктуры имитационного моделирования, позволяющей выполнять имитационное моделирование функционирования бортовой аппаратуры космического аппарата [9]. Стандарт задает общие принципы описания интерфейсов моделей и регламентирует функциональность программных модулей, составляющих ядро инфраструктуры моделирования, однако он оставляет нерешенным ряд вопросов построения, моделирования, обеспечения интеграции и взаимодействия моделей, которые решаются разработчиками программных систем самостоятельно. Предложены технологические принципы реализации заложенных в SMP2 архитектурных требований к инструментальной среде, дополненные оригинальными элементами информационно-графического и интеллектуального моделирования [10]. Собственные технологические подходы [11; 12] позволили авторам обеспечить возможность использования моделей в различных проектах и на различных имитаторах с учетом специфики задач моделирования бортовых систем космических аппаратов. Предложенная архитектура инфраструктуры имитационного моделирования содержит совокупность важнейших решений по организации программной среды, определяет выбор структурных элементов, способных обеспечить построение, функционирование и интеграцию моделей технических устройств. Технология построения инфраструктуры содержит расширение унифицированных подходов к представлению SMP2-моделей средствами построения и использования семантических конструкций предметной области и баз знаний, описывающих логику работы моделей. Предложенная технология позволяет создать проблемно-ориентированную среду, предоставляющую удобные инструменты информационно-графического и интеллектуального моделирования и в то же время поддерживающую совместимость имитационных моделей и их переносимость между различными инфраструктурами.

Назначение и функции инфраструктуры имитационного моделирования. Инфраструктура имитационного моделирования предназначена для поддержки работы конструкторов бортовой аппаратуры космических систем. Ее функции определяются основными задачами конструирования: поддержка проектирования бортовой аппаратуры, формирование и анализ конструкторских решений на различных этапах жизненного цикла производства космической техники. Программные инструменты, необходимые для решения этих задач, должны быть предметно ориентированы, визуальны и удобны для работы специалистов предметной области без применения специальных навыков программирования. Конструктор бортовой аппаратуры должен иметь возможность строить модели функционирования космических систем, применяя готовые модели оборудования различных производителей или создавая собственные, выполнять интеграцию и задание методов взаимодействия моделей, подготавливать сценарии, проводить имитационные эксперименты, выполнять анализ и просматривать результаты моделирования.

Для наглядного построения моделей, задания их структуры и определения связей между элементами авторы разработали методы и программное обеспечение информационно-графического моделирования. Инструменты позволяют конструктору оперировать привычными семантическими конструкциями для построения моделей функционирования бортовой аппаратуры. Методы функционирования моделей задаются в виде правил (condition-action rules) [13]. Специализированные инструменты формирования баз знаний [14], разработанные авторами, позволяют описать различные варианты поведения моделируемых объектов. Разработанные оригинальные инструменты прошли апробацию и позволили построить модели функционирования бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата [15]. Внедрение их в инфраструктуру имитационного моделирования расширит возможности построения моделей и обеспечит их переносимость и интегрируемость в комплексные решения. Инфраструктура должна содержать как программные компоненты, спецификации, имитационные модели и результаты экспериментов, так и базы знаний, консолидирующие знания и опыт экспертов по созданию бортовой аппаратуры космических систем.

Для реализации технологии построения комплексной модели бортовой аппаратуры требуется выполнить проектирование комплексной модели, реализацию моделей на основе правил, импорт готовых SMP-моделей сторонних производителей, интеграцию моделей в комплексную модель, подготовку к проведению моделирования, проведение имитационных экспериментов, анализ и визуализацию результатов моделирования (рис. 1).

Выделение функциональных задач технологии построения комплексной модели бортовой аппаратуры позволило определить основные программные модули, необходимые для их решения: инструменты информационно-графического моделирования, подсистема интеграции, редактор правил, редактор модели и редактор сценариев, имитационное ядро, включающее подсистемы управления временем, менеджер событий, подсистема логирования, механизмы имитационного моделирования анализа и выполнения правил, обозреватель результатов. Каждая из указанных подсистем представляет собой специализированный инструмент, предоставляющий расширенные возможности для решения задач. Высокий уровень проблемной ориентации обеспечивается за счет инструментов графического моделирования и редактора правил. Проблемная ориентация упростит использование готового программного обеспечения и построенных моделей конструкторами бортовой аппаратуры. Реализация отдельных программных подсистем в виде единого решения представляет сквозную технологию моделирования и анализа функционирования бортовой аппаратуры космического аппарата.

Архитектура инфраструктуры моделирования бортовой аппаратуры. Разработана архитектура программного обеспечения, предназначенного для имитационного моделирования бортовой аппаратуры

космического аппарата (рис. 2). Требования к функционалу и дизайну определены, исходя из назначения системы, особенностей объекта моделирования и квалификации специалистов проблемной области. Определены программные подсистемы, необходимые для построения моделей, их интеграции и проведения имитационных экспериментов. Ядро имитационного моделирования обеспечивает как функциональность, заложенную в стандарте SMP2, так и оригинальные программные инструменты.

Центральным элементом инфраструктуры имитационного моделирования является банк моделей и сценариев. Он обеспечивает единое информационное пространство для построения и использования моделей, целостность и контроль версий и служит инструментом коллективной разработки крупных моделей сложных технических объектов.

Для поддержки централизованной работы с банком моделей программное обеспечение инфраструктуры имитационного моделирования разделено на серверную и клиентскую части.

Серверная часть инфраструктуры обеспечивает доступ к централизованному хранилищу данных: банку моделей, сценариев и результатов имитационных экспериментов. В состав серверной части входят подсистемы доступа к данным и логирования, которые обеспечивают взаимодействие с базой данных и файловым хранилищем. Механизмы контроля версий и синхронизации позволят конструкторам бортовой аппаратуры на рабочих местах дорабатывать и дополнять имитационные модели. Это особенно актуально в масштабах большого предприятия, где разработкой отдельных подсистем и их моделей занимаются различные структурные подразделения.

Клиентская часть программного обеспечения предназначена для функционирования на рабочих местах конструкторов бортовой аппаратуры. Она позволяет конструктору решать все возникающие при моделировании задачи. Конструктор может использовать редактор моделей, подсистему построения правил и подсистему интеграции моделей в стандарте SMP2.

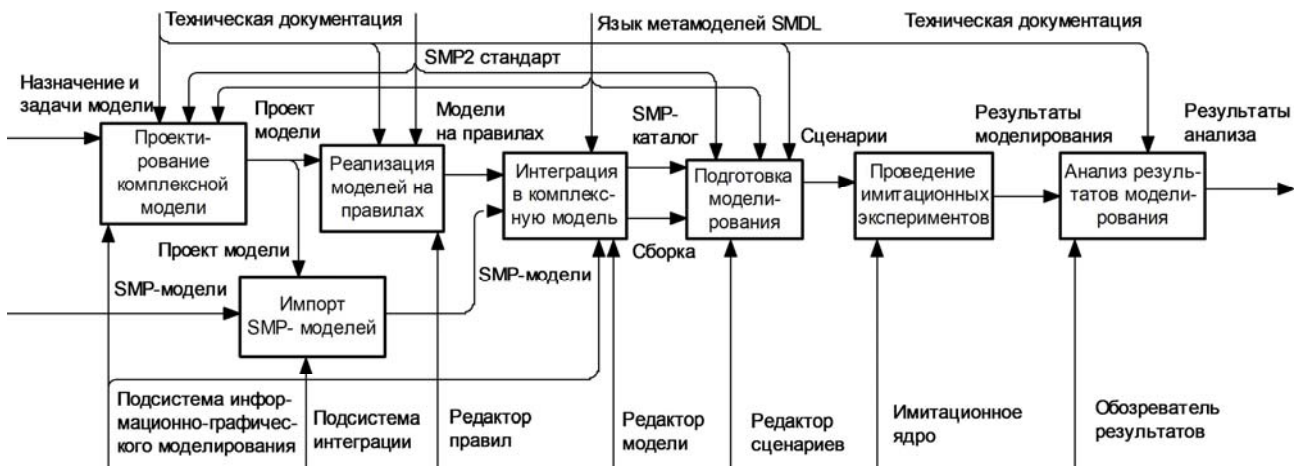


Рис. 1. Технология построения комплексной модели бортовой аппаратуры

Fig. 1. Technology of building a complex model of on-board equipment

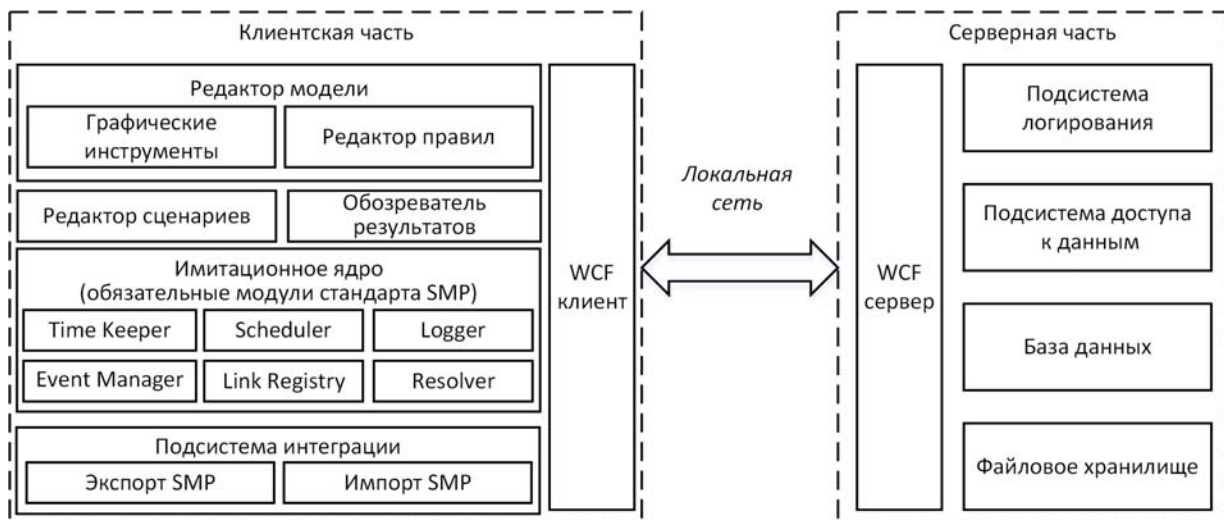


Рис. 2. Архитектура программного обеспечения инфраструктуры

Fig. 2. Architecture of software infrastructure

Ядро инфраструктуры имитационного моделирования содержит все необходимые модули, заданные в стандарте SMP2. На рис. 2 наименования модулей приведены в соответствии со стандартом: Time Keeper, Scheduler, Logger, Event Manager, Link Registry, Resolver. Time Keeper (хронометр) управляет временем моделирования. Этот модуль поддерживает абсолютное и проектное время моделирования. Все модели синхронизируются и выполняются, запрашивая время и изменяя время. Наличие хронометра позволяет обеспечивать различные режимы моделирования: режим реального времени, ускоренный, максимально быстрый, пошаговый. Scheduler (планировщик) управляет выполнением событий, запускает входные точки модели, добавляет или удаляет события, контролирует счетчик повторений и время между повторениями для событий. Logger (модуль протоколирования) обеспечивает отправку сообщений в имитационный протокол для всех объектов в имитаторе. Event Manager (менеджер событий) обеспечивает глобальный механизм уведомлений в соответствии с входными точками, связанными с глобальными событиями. Link Registry (регистрация связей) поддерживает список связей между компонентами, возвращает коллекцию всех компонентов, которые имеют связь с целевым компонентом. Модуль регистрации связей используется для удаления объектов из модели. Resolver поддерживает ссылки на компоненты по имени либо по полному или относительному пути.

Редактор моделей включает подсистему информационно-графического моделирования и редактор правил. Редактор предоставляет инструменты графического моделирования для визуального отображения структуры моделируемой системы, моделей подсистем и связей между ними. В редактор моделей входит подсистема построения сборки, являющаяся обязательной в стандарте SMP2. Подсистема сборки позволяет создавать комплексные модели, определяя основные и резервные реализации моделей оборудования, входов, выходов и связей между моделями. Дополнительно в нашей реализации подсистема сборки обеспечивает интеграцию моделей в формате SMP2 с моделями, основанными на правилах [16]. Подсистема построения правил содержит инструменты для описания поведения элементов модели и их реакций на входные воздействия. Подсистема правил представляет собой интеллектуальный конструктор, который предлагает пользователю выбирать допустимые действия или операции в зависимости от структуры и элементов правила.

Наличие в инфраструктуре графического редактора моделей и подсистемы правил выгодно отличает разрабатываемую инфраструктуру от существующих. Графические и интеллектуальные инструменты позволяют инженеру-конструктору строить модели космических систем, оперируя терминами и понятиями предметной области, обеспечивают удобство работы и минимизируют возможность ошибки. Такой подход способствует формированию и накоплению знаний о методах функционирования бортовой аппаратуры космических систем.

В стандарте SMP2 модель описывается на языке Simulation Model Definition Language (SMDL) [17]. Это формальный язык представления моделей, который понимается всеми инфраструктурами имитационного моделирования. В нашей инфраструктуре подсистема интеграции выполняет автоматическую интерпретацию моделей в SMDL-описании, дополняя ее структурами и механизмами, поддерживаемыми в инфраструктуре имитационного моделирования. При экспорте модели подсистема формирует выходные файлы, включающие метамодель, библиотеки моделирования, конфигурационные файлы. В отличие от существующих инфраструктур, для импорта и экспорта моделей в формат SMP2 пользователю не потребуется знание не только специализированного языка моделирования SMDL, но и дополнительных навыков программирования. Подсистема включает в себя инструменты, позволяющие через графический интерфейс настраивать параметры импорта и экспорта моделей.

Для подготовки имитационных экспериментов предназначена подсистема построения сценариев. Эксперименты могут отражать различные условия работы моделируемой системы. Для каждой модели может быть построено произвольное число сценариев имитационного моделирования. В инфраструктуре поддерживается принцип отделения знаний о методах функционирования моделей от их использования. Реализуется данный принцип как на уровне методов логического вывода в базах знаний, так и на уровне формирования и выполнения сценариев моделирования. Модель и построенные для ее испытаний сценарии могут редактироваться независимо. Поддерживается версионность моделей и сценариев. Система контроля версий отслеживает совместимость моделей, используемых в сценарии, и при существенном изменении сохраняет актуальные варианты моделей. Такой подход расширяет возможности проведения имитационных экспериментов и предоставляет гибкие механизмы отладки моделей.

Ядро программного обеспечения спроектировано так, что позволяет выполнять модели на основе стандарта SMP, а также модели, построенные на основе базы правил. Ядро имитационного моделирования позволяет управлять скоростью и ходом проведения имитационных экспериментов. В его задачи входят сбор информации о функционировании модели в процессе выполнения имитационного эксперимента, контроль очередности передачи сообщений между блоками модели и изменения их внутреннего состояния. Заложенные в функции ядра механизмы следят за изменением всех параметров модели и сохраняют их на сервере. Сохраненные данные позволяют выполнять ретроспективный анализ имитационных экспериментов.

Реализация описанных в архитектуре программного обеспечения функциональных подсистем в инфраструктуре имитационного моделирования позволяет создавать, переносить, интегрировать и совместно использовать имитационные модели различного назначения, в том числе разных производителей.

Заключение. Предложена технология построения инфраструктуры имитационного моделирования, позволяющая создавать инструментальные средства для построения, выполнения и интеграции имитационных моделей функционирования бортовой аппаратуры космических аппаратов. Технология задает общие принципы создания имитационных инфраструктур на основе стандарта SMP2 и может быть использована для различных научных проектов.

Разработана архитектура инфраструктуры имитационного моделирования бортовой аппаратуры космического аппарата, которая содержит компоненты для обеспечения интегрируемости и переносимости имитационных моделей между системами имитационного моделирования. Дополнение унифицированных моделей базами знаний и семантическими конструкциями предметной области обеспечивает формирование, сохранение и тиражирование уникального опыта и знаний специалистов-конструкторов бортовой аппаратуры космических систем.

Построенная на основе предложенной технологии предметно-ориентированная инфраструктура способна поддерживать совместимость и переносимость имитационных моделей между различными инфраструктурами, предоставляя удобные инструменты информационно-графического и интеллектуального моделирования. Применение инфраструктуры имитационного моделирования обеспечит возможность создания моделей бортовых систем космических аппаратов, разработки сценариев моделирования, проведения имитационных экспериментов и анализа их результатов.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Красноярского края в рамках научного проекта № 16-41-242042.

Acknowledgments. The reported study was funded by RFBR and the government of Krasnoyarsk region according to the research project № 16-41-242042.

Библиографические ссылки

1. ECSS E-40-07. Simulation modelling platform. ESA Requirements and Standards Division ESTEC. Netherlands, 2011. 49 p.
2. SMP 2.0 Handbook, EGOS-SIM-GEN-TN-0099. Darmstadt, Germany, 2005. Iss. 1.2. 134 p.
3. Cazenave C., Arrouy W. Implementing SMP2 Standard within SimTG Simulation Infrastructure // Simulation and EGSE for Space Programmes. 2012. 14 p.
4. Simsat 3.0: Esoc's New Simulation Infrastructure / J. Eggleston [et al.] // 6th International Symposium on Reducing the Costs of Spacecraft Ground Systems and Operations. 2005. 29 p.
5. Fritzen P., Segneri D., Pignède M. SWARMSIM – The first fully SMP2 based Simulator for ESOC. The role of computational steering in space engineering activities assisted by modelling and simulation. São José dos Campos : INPE, 2014. P. 217–221.
6. Connecting MATLAB to the SMP2 Standard. Harmonizing new and traditional approaches for automatic

model transfer / W. F. Lammen [et al.] ; Netherlands Aerospace Centre. ESTEC Noordwijk, 2016. 20 p.

7. Lammen W. F. MOSAIC 11.0: User Manual, NLR-CR 2015-524 / Netherlands Aerospace Centre. Amsterdam, 2016. 22 p.

8. A training, operations and maintenance simulator made to serve the MERLIN mission / A. Strzepek [et al.] // 14th Intern. Conf. on Space Operations. 2016. P. 11. DOI: 10.2514/6.2016-2410.

9. Моделирование и анализ функционирования бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата / О. С. Исаева [и др.] // Информатизация и связь. 2015. № 1. С. 58–64.

10. Unified description of the onboard equipment model on the basis of the Simulation Model Portability standard / L. F. Nozhenkova [и др.] // Advances in Intelligent Systems Research. 2016. Vol. 133. P. 481–484. DOI: 10.2991/aiie-16.2016.111.

11. Integration technology of the onboard equipment simulation models in simulation modeling infrastructure / L. F. Nozhenkova [et al.] // Proceedings of the 2016 Intern. Conf. on Electrical Engineering and Automation (ICEEA2016). 2016. P. 618–622. DOI: 10.12783/dtetr/iceea2016/6728.

12. Ноженкова Л. Ф., Исаева О. С., Грузенко Е. А. Проектирование и разработка программно-математической модели бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата // Вестник СибГАУ. 2014. Вып. 2(54). С. 114–119.

13. Luger G. F. Artificial Intelligence: Structures and Strategies for Complex Problem Solving. 6th Ed. Boston : Pearson Education, 2009. 754 p.

14. Исаева О. С., Грузенко Е. А. Эвристический метод построения модели функционирования командно-измерительной системы космического аппарата // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2016. № 4-2. С. 28–37.

15. Ноженкова Л. Ф., Исаева О. С., Грузенко Е. А. Метод системного моделирования бортовой аппаратуры космического аппарата // Вычислительные технологии. 2015. Т. 20, № 3. С. 33–44.

16. Компоненты унификации модели бортовой аппаратуры космического аппарата / Л. Ф. Ноженкова [и др.] // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 11-2. С. 284–288.

17. Simulation modelling platform – Volume 2a: Metamodel. ECSS E-40-07 // ESA Requirements and Standards Division ESTEC. Netherlands, 2011. 169 p.

References

1. ECSS E-40-07. Simulation modelling platform. ESA Requirements and Standards Division ESTEC. The Netherlands, 2011, 49 p.
2. SMP 2.0 Handbook, EGOS-SIM-GEN-TN-0099. Germany, Darmstadt. 2005, Issue 1.2, 134 p.
3. Cazenave C., Arrouy W. Implementing SMP2 Standard within SimTG Simulation Infrastructure: Simulation and EGSE for Space Programmes. 2012, 14 p.
4. Eggleston J., Boyer H., Zee D., Pidgeon A., Nisio N., Burro F., Lindman N. Simsat 3.0: Esoc's New Simulation

Infrastructure. *6th International Symposium on Reducing the Costs of Spacecraft Ground Systems and Operations*. 2005, 29 p.

5. Fritzen P., Segneri D., Pignède M. SWARMSIM – The first fully SMP2 based Simulator for ESOC: *The role of computational steering in space engineering activities assisted by modelling and simulation*. São José dos Campos: INPE. 2014, P. 217–221.

6. Lammen W. F., Jaffry D., Moelands J. M., Wijnands Q. *Connecting MATLAB to the SMP2 Standard. Harmonizing new and traditional approaches for automatic model transfer*. Netherlands Aerospace Centre. ESTEC Noordwijk. 2016, 20 p.

7. Lammen W. F. *MOSAIC 11.0: User Manual, NLR-CR 2015-524*. Amsterdam, Netherlands Aerospace Centre, 2016, 22 p.

8. Strzepek A., Esteve F., Salas S., Millet B., Darnes H. A training, operations and maintenance simulator made to serve the MERLIN mission. *14th International Conference on Space Operations*. 2016, P. 11. DOI: 10.2514/6.2016-2410.

9. Isaeva O. S., Gruzenko E. A., Vogorovskiy R. V., Koldyrev A. Yu. [Modeling and analysis of functioning of the spacecraft command and measuring system]. *Informatizatsiya i svyaz*, 2015. No 1. P. 58–64 (In Russ.).

10. Nozhenkova L. F., Isaeva O. S., Gruzenko E. A., Koldyrev A. Yu., Markov A. A., Belorussov A. I., Vogorovskiy R. V. Unified description of the onboard equipment model on the basis of the “Simulation Model Portability” standard. *Advances in Intelligent Systems Research*. 2016, Vol. 133, P. 481–484. DOI: 10.2991/aiie-16.2016.111.

11. Nozhenkova L. F., Isaeva O. S., Gruzenko E. A., Koldyrev A. Yu. Integration technology of the onboard equipment simulation models in simulation modeling infrastructure. *Proceedings of the 2016 International Conference on Electrical Engineering and Automation*

(ICEEA2016). 2016, P. 618–622. DOI: 10.12783/dtetr/iceea2016/6728.

12. Nozhenkova L. F., Isaeva O. S., Gruzenko E. A. [Designing and constructing the program-mathematical model for the spacecraft command and measuring system]. *Vestnik SibGAU*. 2014, No. 2(54), P. 114–119 (In Russ.).

13. Luger G. F. *Artificial Intelligence: Structures and Strategies for Complex Problem Solving* (6th Edition). Boston, Pearson Education, 2009, 754 p.

14. Isaeva O. S., Gruzenko E. A. [Heuristic method of constructing a model of spacecraft command and measuring system]. *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii*. 2016, No. 4–2, P. 28–37 (In Russ.).

15. Nozhenkova L. F., Isaeva O. S., Gruzenko E. A. [The method for system modelling of the spacecraft on-board equipment]. *Vychislitel'nye tekhnologii*. 2015, Vol. 20, No. 3, P. 33–44 (In Russ.).

16. Nozhenkova L. F., Isaeva O. S., Gruzenko E. A., Belorussov A. I. [Components model unification onboard equipment spacecraft]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2016, No. 11–2, P. 284–288 (In Russ.).

17. *Simulation modelling platform – Volume 2a: Metamodel. ECSS E-40-07*. ESA Requirements and Standards Division ESTEC, The Netherlands, 2011, 169 p.

ABOUT TORSION OF PARALLELEPIPED AROUND THREE AXIS

S. I. Senashov*, I. L. Savostyanova, E. V. Filyushina

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: sen@sibsau.ru

The theory of limit state deals with statically determinate condition of solids. In this case the system is closed due to extreme conditions, such properties of matter such as viscosity, elasticity, etc. cannot influence the limit state. In other words, when reaching the limit state the nature of the relationship between stress and strain has no effect on the ultimate state. The study of such systems has been consistently pursued by D. D. Ivlev and his coauthors. To the equilibrium equations they attached two or an equation relating the components of the stress tensor. This led to the closure of the system of equilibrium equations. In the theory of plasticity equations, which are closed with a single yield stress are studied well. The most well-known system describing the ultimate state of deformable bodies are well-studied equations describing the torsion of the plastic bodies, the two-dimensional stationary problem of the theory of plasticity. The article discusses some other systems of equations which are closed only by one equation of flow, which corresponds to the classical theory of plasticity. It is assumed that the components of the velocity vector depend only on two spatial coordinates. In addition, for the component of velocity vector conditions of deformations compatibility are performed identically. The constructed systems can be used to describe the twisting of the parallelepiped around the three orthogonal axes. For the constructed system of equations point group symmetries, conservation laws have been found. It is shown that the system allows 8-dimensional Lie algebra. On the basis of the symmetry group some classes of invariant solutions of rank 1 have been constructed. They depend on arbitrary functions of one variable. It is shown that these solutions can be used to describe plastic torsion of a parallelepiped around three orthogonal axes. It is shown that the system admits infinite series of conservation laws. The concluding paragraph describes the construction of elastic solutions to the problem. It is shown that it boils down to finding three harmonic functions.

Keyword: plasticity theory, limit state, the exact solutions.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 3. С. 545–550

О КРУЧЕНИИ ПАРАЛЛЕЛЕПИПЕДА ВОКРУГ ТРЕХ ОСЕЙ

С. И. Сенашов*, И. Л. Савостьянова, Е. В. Филюшина

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: sen@sibsau.ru

Теория предельного состояния имеет дело со статически определимым состоянием твердых тел. В этом случае система замкнута за счет предельных условий, и такие свойства материи, как вязкость, упругость и т. п., на предельное состояние влиять не могут. Другими словами, при достижении предельного состояния характер связи между напряжениями и деформациями не оказывает влияния на предельное состояние. Исследование таких систем последовательно проводил Д. Д. Ивлева и его соавторы. К уравнениям равновесия они присоединяли два или уравнения, связывающие компоненты тензора напряжений. Это приводило к замкнутости системы уравнений равновесия. В теории пластичности хорошо изучены уравнения, которые замыкаются одним пределом текучести. К наиболее известным системам, описывающим предельное состояние деформируемых тел, относятся хорошо исследованные уравнения, описывающие кручение пластических тел, двумерные задачи стационарной теории пластичности. Рассмотрены некоторые другие системы уравнений, которые замыкаются только одним уравнением текучести, что соответствует классической теории пластичности. Предполагается, что компоненты вектора скоростей зависят только от двух пространственных координат. При этом для компонент вектора скорости деформаций выполняются тождественно условия совместности деформаций. Построенные системы могут быть использованы для описания кручения параллелепипеда вокруг трех ортогональных осей. Для построенной системы уравнений найдены точечные группы симметрий, законы сохранения. Показано, что система допускает восьмимерную алгебру Ли. На основе группы симметрий построены некоторые классы инвариантных решений ранга 1. Они зависят от произвольных функций одной переменной. Показано, что эти решения можно использовать для описания пластического кручения параллелепипеда вокруг трех ортогональных осей. Показано, что система допускает бесконечную серию законов

сохранения. Описано построение упругого решения поставленной задачи. Показано, что оно сводится к нахождению трех гармонических функций.

Ключевые слова: теория пластичности, предельное состояние, точные решения.

Introduction. Some tasks of the deformable solid body mechanics are studied rather well. These are so-called statically definable tasks. These tasks deal with torsion of prismatic bars and with plane strain state. They belong to the wide range of tasks – limit state of deformable bodies. The theory of the limit state is one of the fundamental sections of the deformable solid body mechanics [1]. The theory of the limit state deals with statically definable state of solid bodies. In this case the system is closed at the expense of limit conditions and such properties of matter as viscosity, elasticity, etc. cannot influence the limit state. In other words once the limit state has been achieved, the nature of relation between stress and strain does not influence the limit state. Some of such systems are considered in [1–3].

In the first part one system of plasticity equations which describes the limit state is considered. This system can be used for the description of plastic current around three orthogonal axes.

Problem setting. Suppose $x = x_1$, $y = x_2$, $z = x_3$ – orthogonal axes, u , v , w – components of velocity deformation vector, e_{ij} – components of velocity deformation tensor, σ_{ij} – components of stress tensor. Components of stress tensor conforms with the equilibrium equations

$$\partial_i \sigma_{ij} = 0. \quad (1)$$

On the repeating indexes summing is supposed. Deviator of stress tensor and deformation velocity tensor are coaxial

$$\sigma_{ij} - \delta_{ij} p = \lambda e_{ij}, \quad (2)$$

where δ_{ij} – Kronecker delta; λ – unspecified nonnegative function, $3p = \sigma_{ij}$.

Equation system (1)–(2) closes by Mises yield condition

$$(\sigma_{11} - p)^2 + (\sigma_{22} - p)^2 + (\sigma_{33} - p)^2 + 2(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2) = 2k_s^2. \quad (3)$$

It is known [1] that in case of prismatic bar torsion around oz axis, the field of deformation velocities is as follows

$$u = -yz, v = xz, w = w(x, y). \quad (4)$$

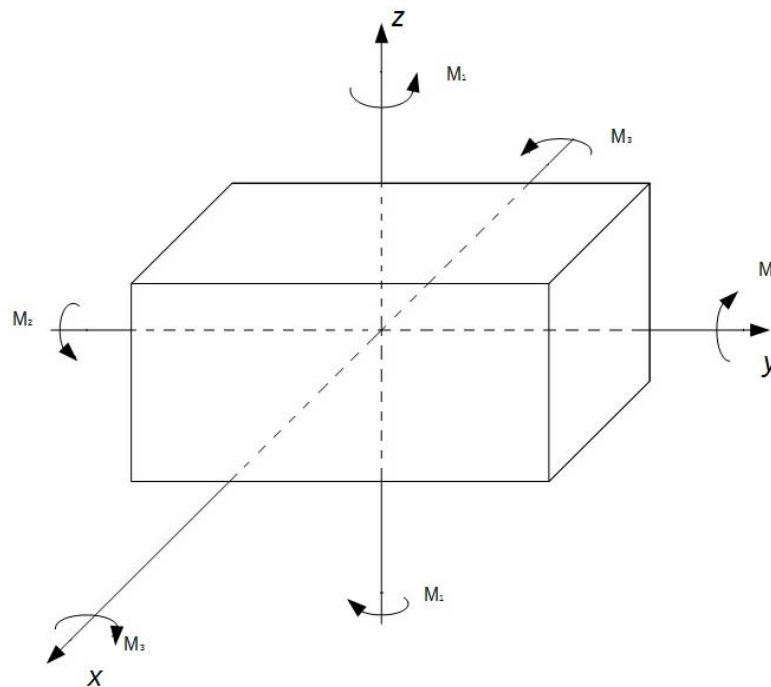
Generalizing ratios (1) we will demand

$$u = u(y, z), v = v(x, z), w = w(x, y). \quad (5)$$

We will construct the system of equations corresponding to the field of deformation velocities. As a result we receive the following system which will be researched in the study presented

$$\begin{aligned} \partial_y \tau^1 + \partial_z \tau^2 &= \partial_x p, \quad \partial_x \tau^1 + \partial_z \tau^3 = \partial_y p, \\ \partial_x \tau^2 + \partial_y \tau^3 &= \partial_z p, \quad (\tau^1)^2 + (\tau^2)^2 + (\tau^3)^2 = k_s^2. \end{aligned} \quad (6)$$

The system of equations (6) can be used, in particular, for the description of rectangular parallelogram in the plastic state torsion around three axes (see a figure.).



The torsion of parallelepiped around the three axes

Кручение параллелепипеда вокруг трех осей

We will assume that the parallelogram twists around axes of ox , oy , oz in equal and opposite pairs of forces with the moments M_1 , M_2 , M_3 . At the same time there are some limit moments M_1 , M_2 , M_3 when the parallelepiped passes into the plastic state and begins to twist. From the system (6) it is visible that such task is statically definable and can serve for limit moment values finding via formulas

$$\begin{aligned} M_1^* &= \iint (y\tau^2 - z\tau^1) dydz, \\ M_2^* &= \iint (z\tau^1 - x\tau^3) dx dz, \\ M_3^* &= \iint (x\tau^3 - y\tau^2) dy dz. \end{aligned} \quad (7)$$

Except the moments (7) the body is affected by hydrostatic pressure

$$P|_{\Sigma} = P_0,$$

Σ – lateral surface of a parallelepiped.

We will now study some properties of the system (7).

1. Characteristic surfaces of system (6).

The system (6) contains the finite ratio, connecting values τ^1, τ^2, τ^3 . After having differentiated it on x, y, z we receive the system

$$\begin{aligned} \partial_y \tau^1 + \partial_z \tau^2 &= \partial_x p, \quad \partial_x \tau^1 + \partial_z \tau^3 = \partial_y p, \\ \partial_x \tau^2 + \partial_y \tau^3 &= \partial_z p, \\ \tau^1 \partial_x \tau^1 + \tau^2 \partial_x \tau^2 + \tau^3 \partial_x \tau^3 &= 0, \\ \tau^1 \partial_y \tau^1 + \tau^2 \partial_y \tau^2 + \tau^3 \partial_y \tau^3 &= 0, \\ \tau^1 \partial_z \tau^1 + \tau^2 \partial_z \tau^2 + \tau^3 \partial_z \tau^3 &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Let's represent the equation of the characteristic surface of the equation system (9) as

$$\psi = \psi(x, y, z), \quad (9)$$

Characteristic surfaces of the system (8) are found from the determinant

$$\begin{vmatrix} \partial_x \psi & \partial_y \psi & \partial_z \psi & 0 \\ \partial_y \psi & \partial_x \psi & 0 & \partial_z \psi \\ \partial_z \psi & 0 & \partial_x \psi & \partial_y \psi \\ 0 & \tau^1 & \tau^2 & \tau^3 \end{vmatrix} = 0. \quad (10)$$

Note. It is easy to see that all three latter equations of the system (8) give identical lines in the determinant (10).

Expanding the determinant (10) on the last line we receive

$$\begin{aligned} &\tau^1 \partial_z \psi \left((\partial_z \psi)^2 - (\partial_x \psi)^2 - (\partial_y \psi)^2 \right) + \\ &+ \tau^2 \partial_y \psi \left((\partial_y \psi)^2 - (\partial_x \psi)^2 - (\partial_z \psi)^2 \right) + \\ &+ \tau^3 \partial_x \psi \left((\partial_x \psi)^2 - (\partial_y \psi)^2 - (\partial_z \psi)^2 \right) = 0. \end{aligned}$$

This equation can be written as

$$\tau^1 n_3 (2n_3^2 - 1) + \tau^2 n_2 (2n_2^2 - 1) + \tau^3 n_1 (2n_1^2 - 1) = 0, \quad (11)$$

$$\text{where } n_1 = \frac{\partial_x \psi}{\sqrt{(\nabla \psi)^2}}, \quad n_2 = \frac{\partial_y \psi}{\sqrt{(\nabla \psi)^2}}, \quad n_3 = \frac{\partial_z \psi}{\sqrt{(\nabla \psi)^2}}.$$

One of solutions of the equation (11) which does not depend on values τ^1, τ^2, τ^3 is

$$2n_i^2 = 1, \quad i = 1, 2, 3.$$

Therefore, an angle between the normal to a characteristic surface $\psi(x, y, z) = 0$ and vector n equals $\pm \pi/4$. Set of elements of the characteristic surface forms the solution cone $\pm \pi/4$ around the direction which is defined by the third root of the equation (11) and depends on tension.

Point symmetries of the equation system (6). Point symmetries are widely used in the studies of differential equations. Necessary data on symmetries and their application to the equations of plasticity and elastic plasticity can be found in [4–8]. Since the system (6) contains finite ratio, we should work with its consequences, which looks like (9), where for convenience the following designations are entered

$$\begin{aligned} \partial_x \tau^1 &= q_1^1, \quad \partial_x \tau^2 = q_1^2, \quad \partial_x \tau^3 = q_1^3, \quad \partial_x p = q_1^4 \text{ etc.}, \\ q_2^1 + q_3^2 &= q_1^4, \quad q_1^1 + q_3^3 = q_2^4, \quad q_1^2 + q_2^3 = q_3^4, \\ \tau^1 q_1^1 + \tau^2 q_1^2 + \tau^3 q_1^3 &= 0, \\ \tau^1 q_2^1 + \tau^2 q_2^2 + \tau^3 q_2^3 &= 0, \\ \tau^1 q_3^1 + \tau^2 q_3^2 + \tau^3 q_3^3 &= 0, \\ (\tau^1)^2 + (\tau^2)^2 + (\tau^3)^2 &= k_S^2. \end{aligned} \quad (12)$$

We will search for point symmetries relative to which the diversity determined by the system of equations (12) is invariant.

According to Lie-Ovsyannikov's technique, we will search for the admissible operator of point symmetry in view of

$$X = \xi^j \frac{\partial}{\partial x_j} + \eta^i \frac{\partial}{\partial \tau^i}, \quad j = 1, 2, 3; \quad i = 1, 2, 3, 4. \quad (13)$$

We continue the operator (13) on the first derivatives by formulas

$$\tilde{X} = X + \zeta_k^i \frac{\partial}{\partial q_k^i}, \quad (14)$$

$$\text{where } \zeta_k^i = D_k(\eta^i) - q_k^i D_k(\zeta^\beta), \quad D_k = \frac{\partial}{\partial x_k} + q_k^i \frac{\partial}{\partial \tau^i}.$$

With the operator (14) we affect the system of equations (13) and transfer to the diversity set by this system. As a result we receive polynoms of the second level in relation to “internal” – endogenous variables q_k^2, q_k^3 . “External” – exogenetic variables q_k^1, q_k^4 are determined from the system (12) via endogenous variables. In the received polynoms of the second level we equate coefficients to zero in case of the first and second levels of endogenous variables. It allows to receive the redefined

system of linear differential equations with respect to coefficients q_k^2, q_k^3 . Solving this system, obtained is the following result.

Theorem. The system of equations (6) allows Lie algebra L_8 , generated by operators

$$\begin{aligned} X_i &= \frac{\partial}{\partial x_i}, \quad X_4 = x_i \frac{\partial}{\partial x_i}, \quad X_5 = \frac{\partial}{\partial p}, \\ X_{12} &= x_2 \frac{\partial}{\partial x_1} - x_1 \frac{\partial}{\partial x_2} + \tau^2 \frac{\partial}{\partial \tau^1} - \tau^1 \frac{\partial}{\partial \tau^2}, \\ X_{13} &= x_1 \frac{\partial}{\partial x_3} - x_3 \frac{\partial}{\partial x_1} + \tau^1 \frac{\partial}{\partial \tau^3} - \tau^3 \frac{\partial}{\partial \tau^1}, \\ X_{23} &= x_3 \frac{\partial}{\partial x_2} - x_2 \frac{\partial}{\partial x_3} + \tau^3 \frac{\partial}{\partial \tau^2} - \tau^2 \frac{\partial}{\partial \tau^3}. \end{aligned}$$

Availability of the operators $X_i, i = 1, 2, 3, 4$ means that the system (6) allows shifts and stretching on axes x, y, z $x'_i = x_i + a_i, i = 1, 2, 3, x'_i = x_i \exp a_4$, shift for hydrostatical pressure $p' = p + a_5$, as well as rotation around three coordinate axes.

2. Invariant solutions of equation system (6).

2.1. Let's create invariant solution relative to subalgebra generated by the operator

$$X_3 = \frac{\partial}{\partial z}.$$

This type of solution should be searched in the following view

$$\tau^i = \tau^i(x, y), \quad p = p(x, y). \quad (15)$$

We add (15) in system (6) and we obtain

$$\begin{aligned} \partial_y \tau^1 &= \partial_x p, \quad \partial_x \tau^1 = \partial_y p, \quad \partial_x \tau^2 + \partial_y \tau^3 = 0, \\ (\tau^1)^2 + (\tau^2)^2 + (\tau^3)^2 &= k_S^2. \end{aligned} \quad (16)$$

From (16) easily obtain

$$\begin{aligned} \tau^1 &= f(x+y) + g(x-y), \quad p = f(x+y) - g(x-y), \\ \partial_y \tau^1 + \partial_z \tau^2 &= \partial_x p. \end{aligned} \quad (17)$$

Now functions τ^2, τ^3 are determines from the equation systems

$$\partial_x \tau^2 + \partial_y \tau^3 = 0, \quad (\tau^2)^2 + (\tau^3)^2 = k_S^2 - (\tau^1)^2. \quad (18)$$

The equation system (18) describes the bar torsion in the conditions when the yield stress (limit of fluctuation) depends on variables x, y . These tasks are considered in [4] and in the literature quoted.

2.2. Let's construct the invariant decision relative to subalgebra generated by the operator X_{12} . This operator in cylindrical coordinate system $r\theta z$ looks like $X_{12} = \frac{\partial}{\partial \theta}$.

In this case the system (6) will be written as follows

$$\begin{aligned} \partial_\theta \tau_{r\theta} + \partial_z \tau_{rz} &= r \partial_r p, \quad r \partial_r \tau_{r\theta} + r \partial_z \tau_{\theta z} + 2 \tau_{r\theta} = \partial_\theta p, \\ r \partial_r \tau_{rz} + \partial_\theta \tau_{\theta z} + \tau_{rz} &= \partial_z p, \\ \tau_{r\theta}^2 + \tau_{rz}^2 + \tau_{\theta z}^2 &= k_S^2. \end{aligned} \quad (19)$$

Invariant solution in this case is determined from the following system

$$\begin{aligned} \partial_z \tau_{rz} &= r \partial_r p, \quad r \partial_r \tau_{r\theta} + r \partial_z \tau_{\theta z} + 2 \tau_{r\theta} = 0, \\ r \partial_r \tau_{rz} + \tau_{rz} &= \partial_z p, \\ \tau_{r\theta}^2 + \tau_{rz}^2 + \tau_{\theta z}^2 &= k_S^2. \end{aligned} \quad (20)$$

In this case τ_{rz} is determined from the linear differential equation

$$r \partial_r \tau_{rz} + r^2 \partial_r^2 \tau_{rz} - \tau_{rz} + r^2 \partial_z^2 \tau_{rz} = 0.$$

Other functions are determined from the system (21).

3. Conservation laws of equation system (6).

Conservation laws are applied to solutions of elastic – plasticity equations. Necessary determination and examples conservation laws usability can be found in [9–15].

Let's find conservation laws of equation system (6) in the following view

$$\begin{aligned} \partial_x A(\tau^1, \tau^2, \tau^3, p) + \partial_y B(\tau^1, \tau^2, \tau^3, p) + \\ + \partial_z C(\tau^1, \tau^2, \tau^3, p) = 0. \end{aligned}$$

The equate is done on the account of equation system (6). From this follow the ratio

$$\begin{aligned} X_{12} A - \tau^2 \partial_p B + \tau^1 \partial_p C &= 0, \\ X_{13} B - \tau^3 \partial_p A + \tau^1 \partial_p C &= 0, \quad X_{12} B - \tau^2 \partial_p A = 0, \\ X_{12} C - \tau^1 \partial_p A &= 0, \\ X_{13} C + \tau^1 \partial_p B &= 0, \quad X_{13} A - \tau^3 \partial_p B = 0, \end{aligned}$$

where $X_{12} = -\tau^2 \partial_{\tau^1} + \tau^1 \partial_{\tau^2}$, $X_{13} = -\tau^3 \partial_{\tau^1} + \tau^1 \partial_{\tau^3}$.

Let's show that these equations are compatible. Suppose $\partial_p A = \partial_p B = \partial_p C = 0$, than – one of the solutions will be the infinite series

$$A(S), B(S), C(S),$$

where $S = (\tau^1)^2 + (\tau^2)^2 + (\tau^3)^2$, $A(S), B(S), C(S)$ – random differentiable functions.

Remark. Are there other laws? Not stated, but according to the author other conservation laws do not exist.

4. It is clear, for the system (6) tension state is the most relevant. Supposing it is known. Than to find three components of the velocity vector we have three equations

$$\tau^1 = \lambda e_{12}, \quad \tau^2 = \lambda e_{13}, \quad \tau^3 = \lambda e_{23}, \quad (21)$$

where

$$\begin{aligned} 2e_{12} &= \partial_y u + \partial_x v, \quad 2e_{13} = \partial_z u + \partial_x w, \\ 2e_{23} &= \partial_z v + \partial_y w. \end{aligned} \quad (22)$$

Let's show that the equations (21) can be solved in terms of deformation velocity tensor components. It is known that except the equations (21) deformation velocity tensor components shall satisfy equations of compatibility as well. Owing to ratios (22) and (5) only six of them remain.

$$\begin{aligned} \partial_{xy}^2 e_{12} &= 0, \quad \partial_{xz}^2 e_{13} = 0, \quad \partial_{yz}^2 e_{23} = 0, \\ \partial_x (\partial_x e_{23} - \partial_z e_{12} - \partial_y e_{13}) &= 0, \\ \partial_y (\partial_y e_{13} - \partial_z e_{12} - \partial_x e_{23}) &= 0, \\ \partial_z (\partial_z e_{12} - \partial_y e_{13} - \partial_x e_{23}) &= 0. \end{aligned} \quad (23)$$

Theorem. The compatibility equations of deformation speeds are done identically.

In this case from (21) we have

$$\begin{aligned}(\tau^1)^2 (e_{12}^2 + e_{13}^2 + e_{23}^2) &= k_s^2 e_{12}^2, \\(\tau^2)^2 (e_{12}^2 + e_{13}^2 + e_{23}^2) &= k_s^2 e_{23}^2, \\(\tau^3)^2 (e_{12}^2 + e_{13}^2 + e_{23}^2) &= k_s^2 e_{13}^2.\end{aligned}\quad (24)$$

Equation system (24) is a system of linear homogeneous equations relevant to variables $e_{12}^2, e_{13}^2, e_{23}^2$. Its determinant is

$$\begin{vmatrix}(\tau^1)^2 - k_s^2 & (\tau^1)^2 & (\tau^1)^2 \\(\tau^2)^2 & (\tau^2)^2 - k_s^2 & (\tau^2)^2 \\(\tau^3)^2 & (\tau^3)^2 & (\tau^3)^2 - k_s^2\end{vmatrix}.$$

This determinant equals zero as the amount of all lines is equal to zero. It means that the system (24) has only two independent equations for three components of a deformation speed tensor. For example, value e_{23}^2 can be picked up randomly, thus for the given tension state, defined from the system (6), velocity field is defined with the functional arbitrariness.

5. In this part we will consider three-dimensional equations of elasticity in static. The system of equilibrium equations is described using equations (1), relation between components of stress tensor and deformation tensor is as follows

$$\begin{aligned}\varepsilon_{11} &= \frac{(\sigma_{11} - \nu(\sigma_{22} + \sigma_{33}))}{E}, \\ \varepsilon_{22} &= \frac{(\sigma_{22} - \nu(\sigma_{11} + \sigma_{33}))}{E}, \\ \varepsilon_{33} &= \frac{(\sigma_{33} - \nu(\sigma_{22} + \sigma_{11}))}{E}, \\ \varepsilon_{12} &= \frac{\sigma_{12}}{2\mu}, \quad \varepsilon_{13} = \frac{\sigma_{13}}{2\mu}, \quad \varepsilon_{23} = \frac{\sigma_{23}}{2\mu},\end{aligned}\quad (25)$$

where ε_{ij} deformation tensor components, E, μ, ν elastic constants.

Supposing vector deformation components are as follows

$$w_1 = w_1(y, z), \quad w_2 = w_2(x, z), \quad w_3 = w_3(x, z). \quad (26)$$

Inserting (26) into (25) we obtain

$$\begin{aligned}\partial_y w_1 + \partial_x w_2 &= \frac{\sigma_{12}}{2\mu}, \quad \partial_z w_1 + \partial_x w_3 = \frac{\sigma_{13}}{2\mu}, \\ \partial_z w_2 + \partial_y w_3 &= \frac{\sigma_{23}}{2\mu}.\end{aligned}\quad (27)$$

In this case equation (1) with regard to (26), (27) is as follows

$$\begin{aligned}\partial_{yy} w_1 + \partial_{zz} w_1 &= 0, \quad \partial_{xx} w_2 + \partial_{zz} w_2 = 0, \\ \partial_{xx} w_2 + \partial_{yy} w_3 &= 0.\end{aligned}\quad (28)$$

It is shown that components of deformation vector are harmonic functions. The solutions obtained here can be

used for the description of elastic status of the parallelepiped twisted around three orthogonal axes. The moments are defined from formulas (7). As $\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} = 0$, dilatation (volume change) is equal to zero. The solution (27) describes vortex movement characterized by the vector $\bar{\omega}$

$$\bar{\omega} = \begin{pmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ \partial_x & \partial_y & \partial_z \\ w_1 & w_2 & w_3 \end{pmatrix}.$$

Herewith movement paths will be vortex lines which are defined from the equation

$$\frac{dx}{w_1} = \frac{dy}{w_2} = \frac{dz}{w_3}.$$

Conclusion. In the present work for the first time considered is the system which can be used for the analysis of stress state appearing under torsion of the parallelepiped around three orthogonal axes. At that it can be in either plastic or elastic state.

References

1. Ivlev D. D., Maksimova L. A., Nepershin R. I. et al. *Predel'noe sostojanie deformirovannyh tel i gonnyh porod* [The ultimate state of deformed bodies and rocks]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008, 832 p.
2. Ivlev D. D. *Teoriya ideal'noy plastichnosti* [Theory of ideal plasticity]. Moscow, Nauka Publ., 1966, 232 p.
3. Ishlinskij A. Ju., Ivlev D. D. *Matematicheskaya teoriya plastichnosti* [Mathematical theory of plasticity]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001, 701 p.
4. Ol'shak V., Ryhlevskij Ja., Urbanovskij V. *Teoriya plastichnosti neodnorodnyh tel* [The theory of plasticity of inhomogeneous bodies]. Moscow, Mir Publ., 1964, 156 p.
5. Ovsyannikov L. V. *Group Analysis of Differential Equations*. Academic Press, New York, 1982.
6. Senashov S. I., Yakchno A. N. Reproduction of solutions for bidimensional ideal plasticity. *Journal of Non-Linear Mechanics*. 2007, Vol. 42, P. 500–503.
7. Senashov S. I., Yakchno A. N. Deformation of characteristic curves of the plane ideal plasticity equations by point symmetries. *Nonlinear analysis*. 2009, Vol. 71, P. 1274–1284.
8. Senashov S. I., Cherepanova O. N. [New classes of solutions of the minimal surface equations]. *Journal of Siberian Fed. Univ., Math. & Ph.* 2010, No. 3(2), P. 248–255 (In Russ.).
9. Senashov S. I. Conservation Laws, Hodograph Transformation and Boundary Value Problems of Plane Plasticity. *SIGMA*. 2012, Vol. 8, P. 16.
10. Senashov S. I., Yakchno A. N. Some symmetry group aspects of a perfect plane plasticity system, *J. Phys. A: Math. Theor.* 2013, Vol. 46, No. 355202.
11. Senashov S. I., Yakchno A. N. Conservation Laws of Three-Dimensional Perfect Plasticity Equations under von Mises Yield Criterion. *Abstract and Applied Analysis*. 2013, Article ID 702132, 8 p.
12. Senashov S. I., Kondrin A. V., Cherepanova O. N. On Elastoplastic Torsion of a Rod with Multiply

Connected Cross-Section. *J. Siberian Federal Univ., Math. & Physics*. 2015, No. 7(1), P. 343–351.

13. Senashov S. I., Cherepanova O. N., Kondrin A. V. Elastoplastic Bending of Beam. *J. Siberian Federal Univ., Math. & Physics*. 2014, Vol. 7(2), P. 203–208.

14. Senashov S. I., Filyushina E. V., Gomonova O. V. Sonstruction of elasto-plastic boundaries using conservation laws. *Vestnik SibGAU*. 2015, Vol. 16, No. 2, P. 343–360 (In Russ.).

15. Senashov S. I., Vinogradov A. M. Symmetries and Conservation Laws of 2-Dimensional Ideal Plasticity. *Proc. of Edinb. Math. Soc.* 1988, Vol. 31, P. 415–439.

Библиографические ссылки

1. Предельное состояние деформированных тел и гонных пород / Д. Д. Ивлев [и др.]. М. : Физматлит, 2008. 832 с.

2. Ивлев Д. Д. Теория идеальной пластичности. М. : Наука, 1966. 232 с.

3. Ишлинский А. Ю., Ивлев Д. Д. Математическая теория пластичности. М. : Физматлит, 2001. 701 с.

4. Олышак В., Рыхлевский Я., Урбановский В. Теория пластичности неоднородных тел. М. : Мир, 1964. 156 с.

5. Ovsyannikov L. V. Group Analysis of Differential Equations. NewYork : Academic Press, 1982. 401 с.

6. Senashov S. I., Yakchno A. N. Reproduction of solutions for bidimensional ideal plasticity // *Journal of Non-Linear Mechanics*. 2007. Vol. 42. P. 500–503.

7. Senashov S. I., Yakchno A. N. Deformation of characteristic curves of the plane ideal plasticity equations

by point symmetries // *Nonlinear analysis*. 2009. Vol. 71. P. 1274–1284.

8. Senashov S. I., Cherepanova O. N. Новые классы решений уравнений минимальных поверхностей // *Journal of Siberian Fed. Univ., Math. & Ph.* 2010. № 3(2). С. 248–255.

9. Senashov S. I. Conservation Laws, Hodograph Transformation and Boundary Value Problems of Plane Plasticity // *SIGMA*. 2012. Vol. 8. P. 16.

10. Senashov S. I., Yakchno A. N. Some symmetry group aspects of a perfect plane plasticity system // *J. Phys. A: Math. Theor.* 2013. Т. 46, № 355202.

11. Senashov S. I., Yakchno A. N. Conservation Laws of Three-Dimensional Perfect Plasticity Equations under von Mises Yield Criterion // *Abstract and Applied Analysis*. 2013, Article ID 702132. 8 p.

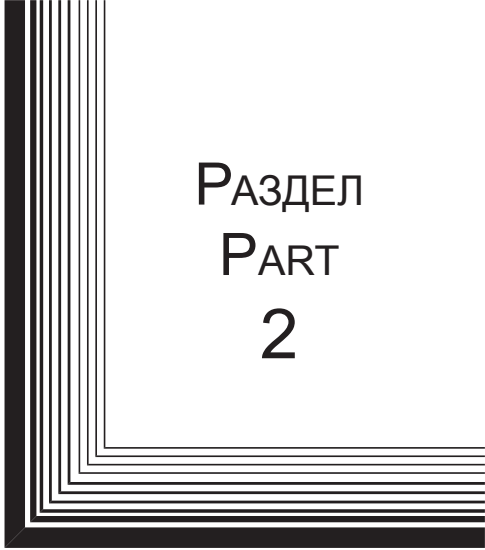
12. Senashov S. I., Kondrin A. V., Cherepanova O. N. On Elastoplastic Torsion of a Rod with Multiply Connected Cross-Section // *J. Siberian Federal Univ., Math. & Physics*. 2015. № 7(1). P. 343–351.

13. Senashov S. I., Cherepanova O. N., Kondrin A. V. Elastoplastic Bending of Beam // *J. Siberian Federal Univ., Math. & Physics*. 2014. № 7(2). P. 203–208.

14. Senashov S. I., Filyushina E. V., Gomonova O. V. Construction of elasto-plastic boundaries using conservation laws // *Вестник СибГАУ*. 2015. Т. 16, № 2. С. 343–360.

15. Senashov S. I., Vinogradov A. M. Symmetries and Conservation Laws of 2-Dimensional Ideal Plasticity. *Proc. of Edinb. Math. Soc.* 1988. Vol. 31. P. 415–439.

© Senashov S. I., Savostyanova I. L., Filyushina E. V., 2017



РАЗДЕЛ
PART
2



АВИАЦИОННАЯ
И РАКЕТНО-
КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

AVIATION
AND SPACECRAFT
ENGINEERING



AIRCRAFT MONITORING IN REMOTE AREAS VIA THE LOW-ORBIT SATELLITE COMMUNICATIONS SYSTEM “IRIDIUM” ALONG WITH THE GSM DATA TRANSMISSION THROUGH ASC-6 TELEMETRY TERMINAL

A. R. Akzigitov*, N. I. Stacenko, N. S. Pisarev, A. N. Efimova, A. S. Andronov

Reshetnev Siberian State University of Science and Tehnology
31, Krasnoyarskiy Rabochiy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: aakzigitov88@mail.ru

One of the most important aims of air traffic control is continuous positioning of aircraft, which makes it possible to control a given flight plan and record deviations from the route, along with organizing search and rescue operations in case of an accident or a disaster. Great difficulties arise when performing this task in areas where there is no radar station in the mountains, forests, at high latitudes or at extremely low altitudes. This problem can be solved by using satellite navigation systems, satellite communication systems and automatic vehicle monitoring.

In order to communicate with the control center, it is advisable to transmit data packets of up to 340 bytes containing information about the location of the aircraft and its status. This can be done via GSM mobile networks, and in areas where there is no communication of this kind, via the satellite communications system “Iridium”. To put these two possible ways of communication into practice, the aircraft must have on board an ASC-6 GLONASS / GPS terminal (a vehicle-compatible modification), which determines location, speed and heading of the aircraft. It is also able to register a number of other parameters, such as the status of the analog / discrete inputs, and RS-232 connected sensors indications. This makes it possible to transmit to the control center not only the geographical position data, but also the speed of the aircraft and other operational data. A special communication module SM-1 can be used to support the satellite communication, as it is ASC-6 compatible through RS-232 interface.

Keywords: GPS, GLONASS, Iridium, monitoring device, GSM, telemetry data, transmission.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 3. С. 552–557

МОНИТОРИНГ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ ПОСРЕДСТВОМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ «ИРИДИУМ» НА ОСНОВЕ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОГО ТЕРМИНАЛА ASC-6

А. Р. Акзигитов*, Н. И. Стаценко, Н. С. Писарев, А. Н. Ефимова, А. С. Андронов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: aakzigitov88@mail.ru

Одной из важнейших задач в обеспечении воздушного движения является непрерывное определение местоположения воздушных судов (ВС), что дает возможность контролировать выполнение заданного плана полета и фиксировать отклонения от маршрута, а также в случае аварии или катастрофы незамедлительно проводить поиск, обнаружение и спасение воздушных судов. Большие трудности возникают при выполнении данной задачи в районах, где отсутствуют радиолокационные станции, в горных местностях, лесных массивах, в высоких широтах и на малых и предельно малых высотах. Целесообразно решать данную проблему с использованием спутниковых навигационных систем, спутниковых систем связи и систем автоматического мониторинга транспортных средств.

Для обеспечения связи ВС с диспетчерским центром предлагается передавать пакеты данных, содержащие информацию о местоположении ВС и его состоянии, объемом до 340 байт, для этого будут использоваться мобильные сети GSM, а в районах, где отсутствует данный вид связи, будут использоваться спутниковую связь «Иридиум». Для решения поставленных задач предложено использовать на борту воздушного судна терминал ASC-6 ГЛОНАСС/GPS, предназначенный для установки на транспортное средство, регистрирующий местоположение, скорость, направление движения ВС. Также дополнительно он способен регистрировать ряд других параметров, таких как состояния аналоговых/дискретных входов и показания датчиков, подключенных по интерфейсу RS-232, что позволит передавать в диспетчерский пункт данные не только о географическом положении и скорости воздушного судна, но и данные о состоянии его работы. Для обеспечения спутниковой связи будет использован модуль спутниковой связи SM-1, который будет интегрироваться по интерфейсу RS-232 с терминальным оборудованием ASC-6.

Ключевые слова: GPS, ГЛОНАСС, Iridium, устройство мониторинга, GSM, передача телеметрических данных.

Introduction. Every year new and more advanced technologies come into different spheres of human activities. At the beginning of the 21st century the global positioning system GPS, and its Russian analog, the Global navigation satellite system (GLONASS) [1; 2] found wide application in many ways, especially in the sphere of transportation. They are widely used in satellite monitoring, which provides determination of mobile objects geographical position, and of their status. To improve transport operations, different remote control devices installed in vehicles perform functions of collecting and transmitting data to the control center [3]. For transmission of packet data, GSM communication system is generally used, as it is not expensive and easily accessible (in most cases frequencies 890-915 MHz are used [4]). However, for aircraft monitoring in remote regions there may be certain technical limits in the use of GSM. To solve this problem, the preference was given to the satellite communication system “Iridium”(the choice was based on the analysis of different satellite systems).

Iridium. To provide reliable data transmission in air-ground communication, the Iridium satellite system is a better choice among other similar systems. Compared to high-orbital and medium-orbital satellite communication systems, low-orbital systems have a number of advantages: low minimum delay (~ 250 mps), small-size antennae, simultaneous communication via several satellites, low-costs equipment [5].

Among the services provided by the Iridium Company, short SBD data packet service is the most appropriate and efficient. It gives an opportunity of short information message exchange between the terminating equipment and the central computing system. Mobile-originated SBD

message may come up to 1960 bytes, Mobile-terminated SBD message may contain up to 1890 bytes [6]. As the SBD Iridium service uses only the access stage in case of regular interconnection, it does not pass through the entire channel from the Iridium gateway to the switchboard and thus has a shorter delay in establishing the connection [7]; this factor plays an important role in the choice of the particular service. High-speed connection and small amount of data makes it possible to transmit the necessary information within a short period, providing a continuous, reliable communication.

ASC-6. For collecting and transmitting data, such subscriber telemetry terminals as ASC-6 has also proved efficient (fig. 1). The ASC-6 GLONASS/GPS terminal is devised to be installed in vehicles. It registers the location, speed and direction of the vehicle [8]. A navigation problem can be solved by means of the global GLONASS navigation system, GPS global positioning system, or using both these systems simultaneously. The terminal can be used for any kind of stationary and mobile objects and vehicles. In addition, it is capable of registering some other parameters, such as status of the analog/discrete inputs and the indication of sensors connected through RS-232 interface. The terminal saves all recorded events and statuses in a non-volatile memory. The stored data are transmitted through a mobile operator network of the GSM 900/1800 standard, using the technology of GPRS packet data transference to the allocated server with a static IP address, from which they can be acquired through the Internet by control centers for further analysis and processing. To keep the communication reliable, the terminal supports the installation of two SIM cards of different mobile operators [9].

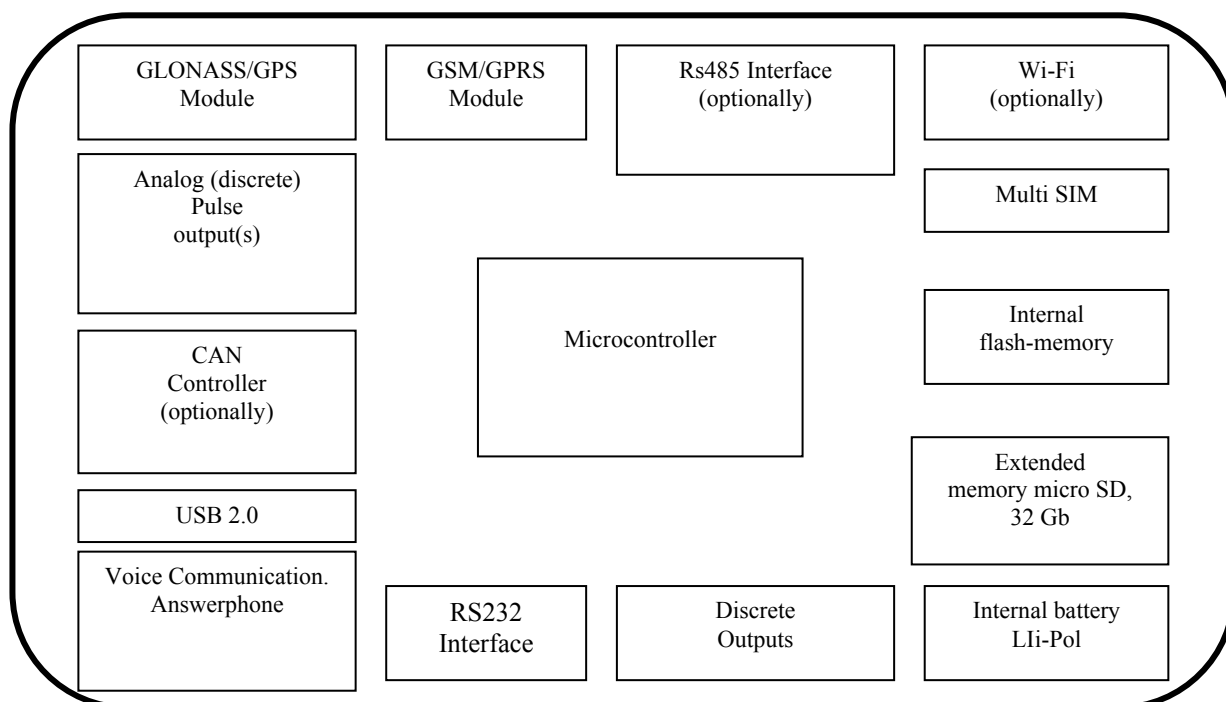


Fig. 1. Structure / operation diagram

Рис. 1. Структурно-функциональная схема терминала

When using GPRS, data are stored in packet form, and then transmitted over several radio channels at a time. These channels can also connect several users in sequence. As voice calls have higher priority than GPRS connection, the transfer of data packages is made only through radio channels free from voice calls, and that can affect the speed of connection. The speed also greatly depends on the quality of network coverage at the location where the connection is required.

GPRS billing depends on the amount of transferred/obtained information, and not on the time of connection. Such billing allows to establish continuous connection to the network, saving time required for making separate calls for packet transmission. The average transmission speed is kept high, 20–40 kbps [10].

The average time of transmission of 340 bytes from board to the control center by means of GSM/GPRS module can be assessed as follows:

$$U = 340 \text{ bytes} = 2.72 \text{ kb (maximum amount of data);}$$

$$V = 20 \text{ kbps (average speed of information transmission over GSM);}$$

$$Y \approx 1\text{--}2 \text{ second (average time of establishing board-earth connection);}$$

$$T = Y + U/V \text{ (full time of data packet transmission);}$$

$$T = 0 + 2.72/20;$$

$$T = 0.14 \text{ second.}$$

Transmission time of a 340 bytes packet is 0.14 seconds (which is average); it can change depending on the distance between the aircraft and the antennas of base stations, weather conditions and the quality of GSM network coverage.

In remote regions where there is no GSM coverage, the terminal will be able to transmit data via SM-1 module working at 1616 MHz – 1626.5 MHz frequencies [11]. The module can be integrated through the RS-232 interface with ASC terminal equipment. That allows determination of the aircraft attitude in regions where there is no GSM service [12]. SM-1 module is devised on the basis of the Iridium 9602 SBD modem made especially for the systems of moving vehicles tracking [13]. The maximum amount of information in one message via SBD channel is 340 bytes, which is enough for keeping track of the aircraft and assessing its status [11].

SBD connection provides the transference of data immediately after the signal has been located, (that takes about 1.5 seconds), so the average time of connection will be about 1.5 seconds for the outgoing SBDs and 3.6 seconds for the incoming SBDs. As the SBD service uses the payload of signaling link, and not the payload of ordinary communication channel, the average exchange speed is about 1.2 kbps [14].

The average time of transference of 340 bytes from board to the control center via SBD Iridium can be assessed as follows:

$$U = 340 \text{ bytes} = 2.72 \text{ kb (maximum amount of data);}$$

$$V = 1.2 \text{ kbps (average speed of information transmission via SBD connection);}$$

$$Y = 1.5 \text{ second (average time of establishing board-earth connection);}$$

$$T = Y + U/V \text{ (full time of data packet transmission);}$$

$$T = 1.5 + 2.72/1.2;$$

$$T = 3.8 \text{ second.}$$

We can conclude that the transference time for 340-byte outgoing data packet via the Iridium network will be 3.8 seconds, which is considerably longer than when using GSM/GPRS modules, but is also within the required limits.

“Navigator-S”. For registering and analyzing the data, the air traffic control center (ATCC) must have the software capable of displaying the information on location of the aircraft and its sensors. This software should have installation requirements acceptable for a personal computer.

The most suitable software is the automated system “Navigator-S”, capable of monitoring mobile and stationary objects. “Navigator-S” is an integrated programmed unit for monitoring mobile objects, especially airborne aircraft [15; 16]. With the terminal installed in the cockpit it will be possible to control not only the attitude of aircraft, but also the parameters of their contact pickups and modulating transducers by transmitting the readings over GSM/SBD Iridium channels.

The experimental on-board system will include the exchange ASC-6 telemetric service station, the satellite communication module SM-1 (Iridium antenna-equipped), GLONASS/GPS and GSM antennas (fig. 2). The operation of this system requires a supply of 10–30V DC from the vehicle’s electric system.

The terminal operation principles. When switched on the terminal initially locates GLONASS and GPS satellites, detects its own attitude, ground speed, GMT, voltage on the inputs. It also registers the sensors’ readings and establishes the connection with the server. As soon as the connection is established, the terminal transmits all the monitoring data to the server at preset intervals. In zones where there is no GSM network coverage (fig. 3), data will be transmitted over the Iridium network SBD channel (fig. 4); they can also be duplicated when there appears the GSM signal. If the connection with the server is not established for some reasons, all information is saved in a non-volatile memory of the terminal and transmitted as soon as the communication is reestablished.

The terminal provides transmission of the following monitoring information:

- GMT and date;
- Coordinates (latitude, longitude, height);
- Ground speed, acceleration and direction;
- Number of satellites (GLONASS+GPS);
- Horizontal Dilution of Precision (HDOP);
- Voltage at the analog inputs;
- Voltage at the impulse inputs;
- Outputs status;
- Information on recorded events;
- Fuel level sensors indication;
- CAN bus readings.

The route is registered in the form of separate time points at which all the information that comes to the terminal from sensors and auxiliary equipment is recorded. The time point is stored in the memory in case of events such as: some deflection in the direction of flight; the point of recording is missed; events at analog / discrete inputs; the device status change. Data on the aircraft attitude and its systems’ functioning are stored and sent as one packet via GSM or Iridium systems to the air traffic control center.

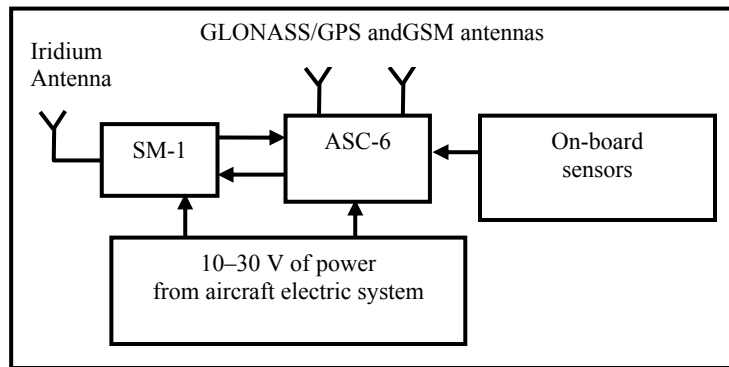


Fig. 2. On-board terminal (experimental make)

Рис. 2. Схема экспериментальной установки

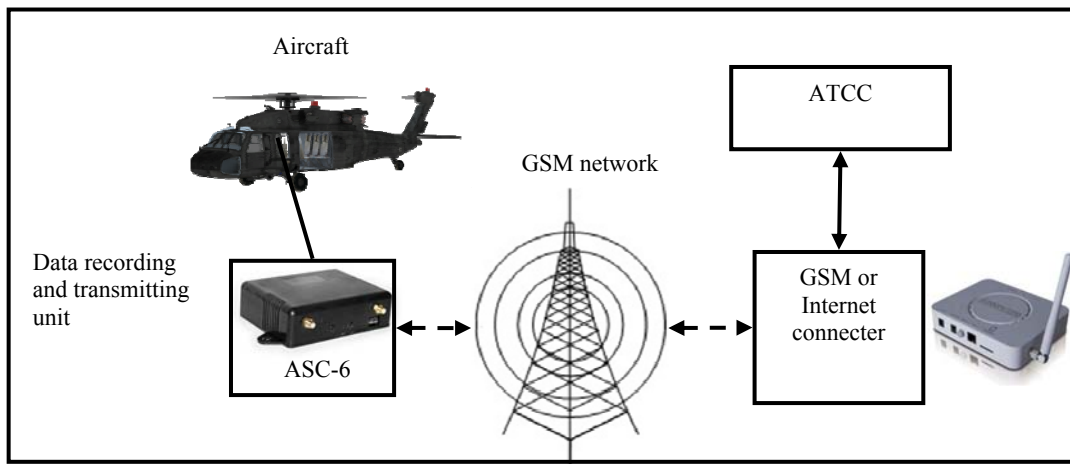


Fig. 3. GSM board-ATCC exchange scheme

Рис. 3. Передача данных с борта ВС в диспетчерский центр с помощью GSM-связи

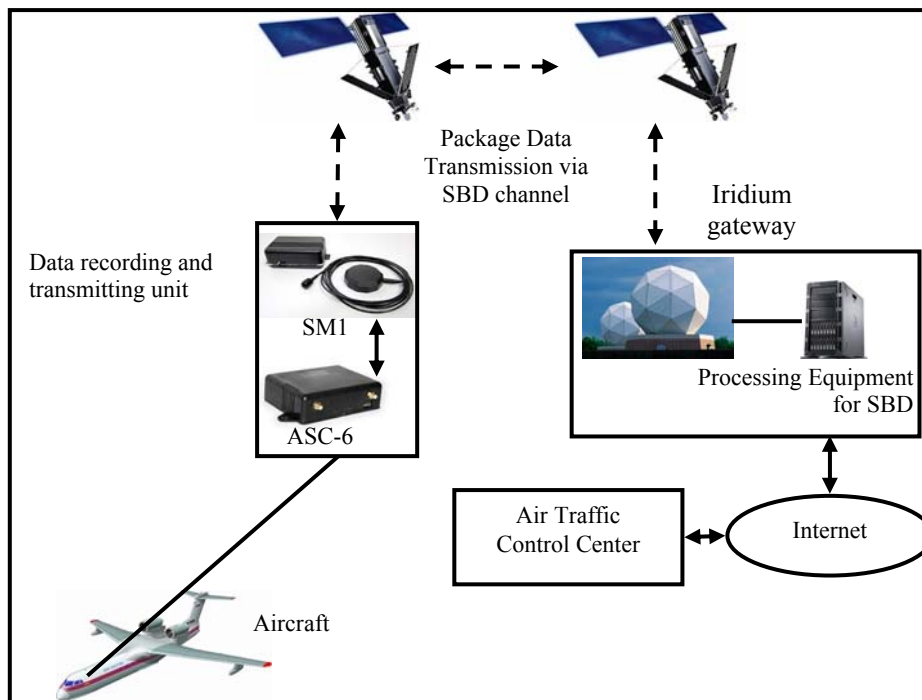


Fig. 4. Iridium board-ATCC exchange scheme

Рис. 4. Передача данных с борта ВС в диспетчерский центр с помощью спутниковой связи

Conclusion. It is obvious that for the purpose of global aircraft monitoring it is impossible to deploy a network of communication stations on the ground; it seems much more effective to employ the widely used GSM network, along with the satellite communication Iridium network which covers the whole surface of the globe.

For receiving and transmitting the flight data, it is advisable to use the subscriber telemetry terminal ASC-6 together with the satellite communication module SM-1. This system will monitor the aircraft route and flight status to provide control of the air traffic, and to organize rescue operations in case of accidents. For the air traffic control system, the "Navigator-S" software is a suitable option, as it has low system requirements acceptable for any modern computer connected to the Internet or equipped with GSM/Iridium modules. The system of satellite monitoring based on the use of the ASC-6 module and "Navigator-S" software will make it possible not only to receive the on-board data in flight, but also to deploy the ATCs in the required locations.

References

1. *Primenenie sistem sputnikovogo monitoringa transportnykh sredstv, dlya obespecheniya effektivnosti logisticheskikh protsessov* [The use of satellite monitoring of vehicles, to ensure the efficiency of logistics processes]. Available at: <http://www.rae.ru/forum2012/21/2998> (accessed: 12.03.2017).
2. *Primenenie GLONASS/GPS monitoring transporta* [The use of GLONASS/GPS monitoring of transport]. Available at: [W8http://gigabaza.ru/doc/49862.html](http://gigabaza.ru/doc/49862.html) (accessed: 12.03.2017).
3. *Monitoring Transporta* [Monitoring of transport]. Available at: <http://monitoringtransporta.ru> (accessed: 12.03.2017).
4. Gromakov Yu. A. *Standarty i sistemy podvizhnoy radiosvyazi* [Standards and mobile radio systems]. Moscow, Eco-Trendz Publ., 1997, 239 p.
5. *Sistema sputnikovoy svyazi Iridium* [The system of satellite communication Iridium]. Available at: <http://www.marsat.ru/Technologies-Iridiumnetwork> (accessed: 12.03.2017).
6. *Rukovodstvo po aviatsionnoy podvizhnoy sputnikovoy (marshrutnoy) sluzhbe* [Guidelines for the aeronautical mobile-satellite (route) service]. ICAO. 2010. P. II.2.18–II.2.21
7. *Rukovodstvo po aviatsionnoy sputnikovoy sluzhbe* [Guidelines for the aeronautical mobile-satellite service]. Available at: <http://libed.ru/knigi-nauka/967188-4-opublikovano-otdelnimi-izdaniyami-russkom-angliyskom-arabskom-ispanskom-kitayskom-francuzskom-yazikah-mezhdunar.php> (accessed: 12.03.2017).
8. ASC-6 GLONASS/GPS Available at: <http://glonassclub.com/index.php?newsid=86> (accessed: 12.03.2017).
9. *Abonentskiy telematicheskii terminal ASC-6 rukovodstvo po ekspluatatsii* [Subscriber telematics terminal ASC-6 manual. "Company AIC COM"]. Perm, 2014. P. 4–7.
10. GPRS. Available at: http://www.smartphone.ua/w_gprs.html (accessed: 12.03.2017).

11. *Modul' sputnikovoy svyazi SM1 rukovodstvo po ekspluatatsii* [Satellite communication module SM1 manual. "Company APK COM"]. Perm, 2013. 3 p.

12. *Modul' sputnikovoy svyazi SM-1* [Satellite communication module SM-1]. Available at: <http://glonassclub.com/index.php?newsid=90>. (accessed: 12.03.2017).

13. *Modem Iridium 9602 SBD* [Iridium Modem 9602 SBD]. Available at: URL: http://iridium-russian.ru/Oborydovanie/Spytnikovyi_modem_SBD_IRIDIUM_9602.html (accessed: 12.03.2017).

14. *Usluga paketnoy peredachi dannykh Iridium SBD* [short data packet service Iridium SBD]. Available at: <http://bezprovodov.net/page/page20.html> (accessed: 12.03.2017).

15. *Avtomatizirovannaya sistema monitoringa mobil'nykh i statsionarnykh ob'ektov "Navigator-S" Rukovodstvo pol'zovatelya* [The monitoring automated system of mobile and stationary objects "Navigator-S" Manual Eagle]. 2006, P. 3–7.

16. *Sistema monitoringa transporta Navigator-S* [The system of monitoring of transport Navigator C]. Available at: http://www.glonass-portal.ru/catalog/soft/monitoring/navigator_s (accessed: 12.03.2017).

Библиографические ссылки

1. Применение систем спутникового мониторинга транспортных средств для обеспечения эффективности логистических процессов [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rae.ru/forum2012/21/2998> (дата обращения: 12.03.2017).
2. Применение ГЛОНАСС/GPS-мониторинга транспорта [Электронный ресурс]. URL: [W8http://gigabaza.ru/doc/49862.html](http://gigabaza.ru/doc/49862.html) (дата обращения: 12.03.2017).
3. Мониторинг транспорта [Электронный ресурс]. URL: <http://monitoringtransporta.ru> (дата обращения: 12.03.2017).
4. Громаков Ю. А. Стандарты и системы подвижной радиосвязи. М. : Эко-Трендз. 1997. 239 с.
5. Система спутниковой связи Iridium [Электронный ресурс]. URL: <http://www.marsat.ru/Technologies-Iridiumnetwork> (дата обращения: 12.03.2017).
6. Руководство по авиационной подвижной спутниковой (маршрутной) службе / ICAO. 2010, С. II.2.18–II.2.21.
7. Руководство по авиационной подвижной спутниковой службе [Электронный ресурс]. URL: <http://libed.ru/knigi-nauka/967188-4-opublikovano-otdelnimi-izdaniyami-russkom-angliyskom-arabskom-ispanskom-kitayskom-francuzskom-yazikah-mezhdunar.php> (дата обращения: 12.03.2017).
8. ASC-6 ГЛОНАСС/GPS [Электронный ресурс]. URL: <http://glonassclub.com/index.php?newsid=86> (дата обращения: 12.03.2017).
9. Абонентский телематический терминал ASC-6: руководство по эксплуатации / ООО «Компания АПК КОМ». Пермь, 2014. С. 4–7.
10. GPRS [Электронный ресурс]. URL: http://www.smartphone.ua/w_gprs.html (дата обращения: 12.03.2017).
11. Модуль спутниковой связи SM1: руководство по эксплуатации / ООО «Компания АПК КОМ». Пермь, 2013. 3 с.

12. Модуль спутниковой связи SM-1 [Электронный ресурс]. URL: <http://glonassclub.com/index.php?newsid=90>. (дата обращения: 12.03.2017).

13. Модем Iridium 9602 SBD [Электронный ресурс]. URL: http://iridium-russian.ru/Oborydovanie/Spytnikovyi_modem_SBD_IRIDIUM_9602.html (дата обращения: 12.03.2017).

14. Услуга пакетной передачи данных Iridium SBD [Электронный ресурс]. URL: <http://bezprovodov.net/page/page20.html> (дата обращения: 12.03.2017).

15. Автоматизированная система мониторинга мобильных и стационарных объектов «Навигатор-С»: руководство пользователя. Орел, 2006. С. 3–7.

16. Система мониторинга транспорта «Навигатор-С» [Электронный ресурс]. URL: http://www.glonass-portal.ru/catalog/soft/monitoring/navigator_s (дата обращения: 12.03.2017).

© Akzigitov A. R., Stacenko N. I., Pisarev N. S.,
Efimova A. N., Andronov A. S., 2017

THE ALGORITHM FOR ESTIMATING RESERVES OF THE WORKING PROCESS STABILITY IN COMBUSTION CHAMBERS AND GAS GENERATORS OF LIQUID ROCKET ENGINES

V. I. Biryukov¹, V. P. Nazarov^{2*}, R. A. Tsarapkin¹

¹Moscow Aviation Institute (National Research University)

4, Volokolamskoe highway, Moscow, 125993, Russian Federation

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: Nazarov@sibsau.ru

The experimental evaluation of the working process stability with respect to acoustic oscillations in combustion chambers and gas generators of liquid rocket engines is one of the main methods used in rocket engine construction. External and internal disturbing devices using explosive hexogen often lead to the damage to the fire walls and structural elements of the aggregates. The disadvantages of traditional external impulse devices also include a considerable wide range of the pressure pulses values generated by them in the combustion chamber with the same value of the sample of the explosive and with the constant parameters of the atmosphere in the combustion chamber, which is due to the scatter of the explosives characteristics. An alternative approach is proposed for creating a pulse effect on the working process in the combustion chamber by exploding an electrical conductor. The disturbing device is made with an explosive chamber connected by a channel with the reaction volume of the combustion chamber. In the electro-impulse disturbing device a thin wire fastened to isolated electrodes is used instead of the charge of the explosive. As a substance used to create a pressure pulse, this generator uses gas filling the blasting chamber, the mass of which depends on the pressure in the combustion chamber and in the chamber of the electro-impulse perturbative device. If one immediately heats this gas to a temperature of several thousand degrees, one can get a gas that is close in parameters to the combustion products of explosives in traditional external impulse devices. Such heating can be carried out by discharging through a wire of an electric capacitor charged to several thousand volts. First, instantaneous (for several microseconds) evaporation of the wire, and then through the plasma channel formed at the site of the wire, the final discharge of the capacitor takes place, with virtually all of the energy stored in the capacitor discharged. The plasma temperature in this case, according to different sources, can reach from several tens of thousands to one million degrees. The gas is also heated by adiabatic compression with a shock wave. The metal particles formed after the evaporation of the wire and the condensation of the vapor have a value of several nanometers and, therefore, do not damage the inner layer of the combustion chamber. The methodological bases are considered and the algorithm for estimating the stocks of stability to acoustic vibrations from the reaction of the combustion process to such pulsed artificial disturbances is developed. There have been developed electro-impulse disturbing devices that reduce the risk of damage to the components of liquid rocket engine assemblies in full-scale and model test, and have an obvious prospect for widespread use.

Keywords: liquid rocket engine, acoustic oscillations, disturbing device, electric explosion of conductors, damping decrement, intercorrelation function.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 3. С. 558–566

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ЗАПАСОВ УСТОЙЧИВОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ И ГАЗОГЕНЕРАТОРАХ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В. И. Бирюков¹, В. П. Назаров^{2*}, Р. А. Царапкин¹

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Российская Федерация, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3

²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: Nazarov@sibsau.ru

Экспериментальная оценка устойчивости рабочего процесса по отношению к акустическим колебаниям в камерах сгорания и газогенераторах жидкостных ракетных двигателей является одним из основных методов, применяемых в ракетном двигателестроении. Внешние и внутренние возмущающие устройства, использующие взрывчатое вещество гексоген, нередко приводят к повреждению огневых стенок и элементов конструкции агрегатов. К недостаткам традиционных внешних импульсных устройств следует также отнести значительный разброс величин генерируемых ими импульсов давления в камере сгорания при одинаковой величине

навески взрывчатого вещества и при постоянстве параметров среды в камере сгорания, что, по-видимому, связано с разбросом характеристик взрывчатых веществ. Предложен альтернативный подход создания импульсного воздействия на рабочий процесс в камере сгорания путем взрыва электрического проводника. Возмущающее устройство выполнено со взрывной камерой, соединённой каналом с реакционным объёмом камеры сгорания. В электроимпульсном возмущающем устройстве вместо навески взрывчатого вещества используется закреплённая на изолированных электродах тонкая проволока. В качестве вещества, используемого для создания импульса давления, в этом генераторе используется заполняющий взрывную камеру газ, масса которого зависит от давления в камере сгорания и в камере электроимпульсного возмущающего устройства. Если мгновенно нагреть этот газ до температуры в несколько тысяч градусов, можно получить газ, близкий по параметрам к продуктам сгорания взрывчатых веществ в традиционных внешних импульсных устройствах. Осуществить такой нагрев можно путём разряда через проволочку заряженного до нескольких тысяч вольт электрического конденсатора. При этом сначала происходит мгновенное (в течение нескольких микросекунд) испарение проволочки, а затем через образовавшийся на месте проволочки плазменный канал происходит окончательная разрядка конденсатора с выделением практически всей накопленной в конденсаторе энергии. Температура плазмы при этом, по разным источникам, может достигать от нескольких десятков тысяч до миллиона градусов. Осуществляется также нагрев газа при адиабатическом сжатии его ударной волной. Образующиеся после испарения проволочки и конденсации паров частицы металла имеют величину нескольких нанометров и поэтому не повреждают внутреннюю оболочку камеры сгорания. Рассмотрены методические основы и разработан алгоритм оценки запасов устойчивости к акустическим колебаниям по реакции процесса горения на такие импульсные искусственные возмущения. Разработаны электроимпульсные возмущающие устройства, которые снижают риск повреждения составных частей агрегатов жидкостных ракетных двигателей при натурных и модельных испытаниях и обладают очевидной перспективой для широкого применения.

Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель, акустические колебания, возмущающее устройство, электрический взрыв проводников, декремент затухания колебаний, взаимокорреляционная функция.

Introduction. All produced combustion chambers and gas generators of liquid rocket engines (LRE) have to be experimentally tested on the stability of the working process with the respect to high-frequency pressure fluctuations in these components in the range of $\pm 10\%$ of their nominal modes [1].

The main task in evaluating the stability of the working combustion process is to determine, with the smallest number of experiments, the tendency of rocket engine components to maintain the instability of combustion and thus to develop measures to suppress it. Another task solved by the methods of stability evaluation is to determine the effectiveness of various means of stabilizing the working process, such as anti-pulsation partitions and acoustic absorbers [2; 3]. Unfortunately, there are no principal means of ensuring the sustainability of the working process. Thus, we always need some relative evaluations of the effectiveness of the chosen method of stabilizing the working process in the developed LRE. Using the experimental methods [1–3] of the stability evaluation, it is possible to determine the most critical mode of oscillations, susceptible to resonant interaction with the combustion process, and to take the necessary measures to suppress it. In addition, the methods of evaluating stability stocks allow us to investigate the effect of changes in the structural elements of engine components and various parameters of the working process on the stability of combustion [1–3]. At present, the evaluation of the stability of the working combustion process in LRE is carried out by introducing a pulse of pressure from the external device into the reaction volume of the combustion chamber through the channel in its wall [1; 3–12]. As a source of pressure in these external impulse devices (EID), a necessary amount of explosive (E) – hexogen, isolated from the channel by a metal membrane [1; 3; 12–14] is

used. When the explosive charge is exploded, the fragments of such a membrane can damage the bronze inner shell of the combustion chamber, deform the blast nozzles, etc. In this regard, the presence of a membrane in these devices is their disadvantage. The disadvantages of traditional EID can also include a considerable range in the values of the pressure pulses generated by them in the combustion chamber while the amount of the explosive stays the same and the parameters of the atmosphere in the combustion chamber are constant, which is apparently related to the range of the explosive characteristics, such as: its laydown thickness, the thickness of the membrane, etc. To eliminate the disadvantages of EID, it has been proposed to use an explosion of a metallic conductor of electric current (wire) when discharging a capacitor with accumulated energy of several thousand joules [4]. At present, hexogen is used as an explosive in EID, with a weight of about 0.5 to 3.5 grams in TNT equivalent. The explosion of one gram of TNT is equivalent to the energy released at the time of the wire explosion of approximately 4390 J. To release this energy, it is sufficient to charge a capacitor of 500 MkF with an electrical voltage of 4200 V to evaporate the conductor.

The development of an electro-impulse disturbing device. The disturbing device [4] is made with an explosive chamber connected by a channel to the reaction volume of the combustion chamber. In the electro-impulse disturbing device (EIDD), instead of the explosive charge, a wire (0.1–0.5 mm) is attached to isolated electrodes. As a substance used to create a pressure pulse, this generator uses the gas filling the blasting chamber, the mass of which depends on the pressure in the combustion chamber and in the EIDD chamber. Thus, for example, the mass of nitrogen, which is used to purge the DD, which fills an explosive chamber with a volume of 8 cm³ at a pressure

of 10 MPa, is ~ 1 g. If you immediately heat this nitrogen to a temperature of several thousand degrees, you can get a gas that is close in parameters to the products of combustion of explosives in traditional disturbing impulse device (DID). It is possible to carry out such heating by discharging through a wire of an electric capacitor charged to several thousand volts. First, instantaneous (for several microseconds) evaporation of the wire takes place, and then through the plasma channel formed at the site of the wire, the final discharge of the capacitor occurs, with the release of all the energy stored in the capacitor. The plasma temperature in this case, according to different sources, can reach from several tens of thousands to one million degrees. The gas is also heated by adiabatic compression with a shock wave. The metal particles formed after the evaporation of the wire and the condensation of the vapor have a value of several nanometers and, therefore, do not damage the inner shell of the combustion chamber. The scheme of the installation with the EIDD is shown in fig. 1.

The design of the experimental sample of a single-charged electro-impulse disturbing device [4] is shown in fig. 2.

EIDD contains the case 1 with the nipple 2 attached to it, through which a pressure pulse is introduced into the combustion chamber. In the case 1, a cavity 3 is formed in which an electrical node 4 is mounted, which is an axisymmetric body made of a dielectric with electrodes 5 firmly fixed therein. The electrodes are retained in the insulator by means of thread bushes 6. The insulator itself is fixed in the case 1 by means of a closing sleeve 7 and a coupling nut 8. Between the end face of the insulator 4 and the end surface of the cavity 3, an explosive chamber 9 is formed into which the ends of the electrodes 5 protrude. A detonating wire 10 is soldered to the ends of the electrodes 5. In the case 1 the hole 11 with the welded fitting pipe 12 is made for blowing the explosion chamber with nitrogen. The results of preliminary studies confirm the

sufficiency of the energy of the shock wave in calculating the stocks of stability of the working process in the combustion chambers of LRE in relation to high-frequency (HF) pressure fluctuations.

The algorithm for estimating stability reserves of working process as the result of the spectral processing of pressure pulsations in LRE aggregates during bench tests. The dynamics of a quasilinear system with given initial conditions and external influences is described by a system of equations for preserving the material balance, and after their linearization, the harmonic oscillator equation is obtained [2; 5–11]. Often, Laplace transforms over time variable t are applied to the equations of free oscillations in perturbations, or the change of variables $x = x e^{\int \delta dt}$ is introduced. As a result, we obtain a nonlinear *characteristic* equation of the dynamical system, which has order one unity less than the initial one. In general, it can be represented as:

$$(\delta + p)^{n-1} \delta + b_1(\delta + p)^{n-2} + \dots + b_{n-2}(\delta + p) + b_{n-1} \delta + b_n = 0, \quad (1)$$

here p – differentiation operator,

$$p = \frac{d}{dt}.$$

The characteristic equation (1) has n roots that form the *fundamental system of solutions of the free oscillation equations* after the reverse transition to the variable x .

The case of forced oscillations of a linear dynamical system is investigated by the influence of an impulse signal on the system. Then variables mean *output* values, and external influences make *input*.

The *impulse response function of the system* w describes the change in the output volume from the rest state to the new state and is characterized by a change in time t and the moment of application of the pulse δ_1 . The condition of physical feasibility can be formulated as

$$w(t, \delta_1) = 0, \quad t < \delta_1. \quad (2)$$

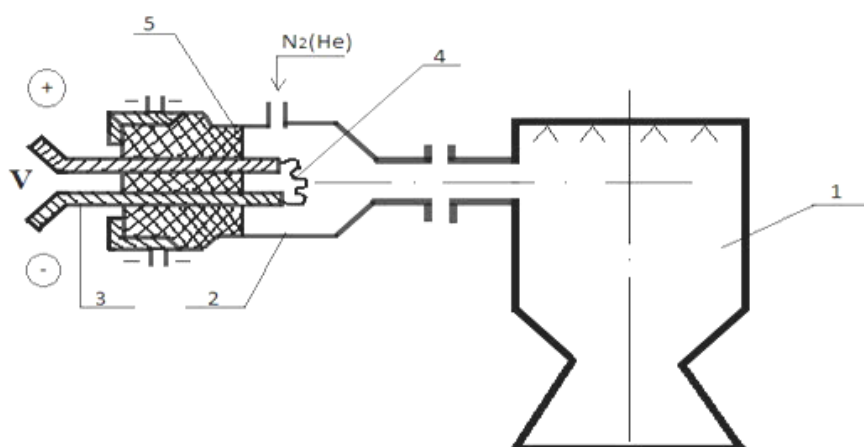


Fig. 1. The scheme of the proposed concept of EIDD (electro-impulse disturbing device): 1 – combustion chamber of a liquid rocket engine; 2 – electro-impulse disturbing device; 3 – electrodes; 4 – exploding electric cord (wire); 5 – electrical insulator

Рис. 1. Схематическое изображение предлагаемой концепции ЭИВУ: 1 – камера сгорания ЖРД; 2 – ЭИВУ; 3 – электроды; 4 – взрывающийся электрический провод (проволочка); 5 – электроизолятор

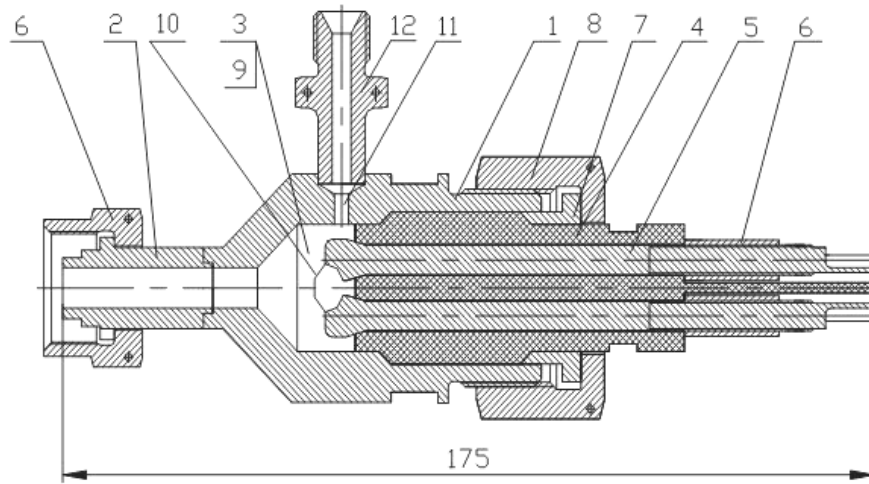


Fig. 2. The design of the pressure pulse generator (electro-impulse disturbing device): 1, 2 – the case with a nipple; 3 – the volume for introduction of nitrogen; 4 – insulator; 5 – electrodes; 6 – thread bushings; 7 – closing sleeve; 8 – coupling nut; 9 – blasting chamber; 10 – wire; 11, 12 – the channel and the nitrogen supply connection

Рис. 2. Конструкция генератора импульсов давления (ЭИВУ):

1, 2 – корпус с ниппелем; 3 – объем для ввода азота; 4 – изолятор; 5 – электроды; 6 – резьбовые втулки; 7 – втулка нажимная; 8 – гайка накидная; 9 – взрывная камера; 10 – проволока; 11, 12 – канал и штуцер подачи азота

The transfer function $W(s, t)$ is a function of the complex variable s and real t , related to the impulse response of the equation

$$W(s, t) = \int_0^{\infty} w(t, t - \tau) e^{-s\tau} d\tau, \quad (3)$$

where $\tau = t - \delta_1$.

The transfer function is meaningful only in the region of the complex variable s , where for its real part $Re(s)$ the inequality takes place

$$Re(s) > c_0$$

and at the same time the conditions are observed

$$\int_0^{\infty} |w(t, t - \tau)| e^{-s\tau} d\tau < \infty \text{ if } c \geq c_0. \quad (4)$$

In the theory of stationary linear systems, the transfer function is treated as the Laplace transform of the function $w(\tau)$, which is the response of the system to a unit pulse at time $t = 0$:

$$W(s) = \int_0^{\infty} w(a, a - \tau) e^{-s\tau} d\tau = \int_0^{\infty} w(\tau) e^{-s\tau} d\tau. \quad (5)$$

The transfer function of a linear stationary system is the Laplace transform from the function $w(\tau)$, which shows its response at time $t = a$ to the impulse applied earlier: $a - \tau$.

For the characteristic equation in the form of

$$\frac{d^n x}{dt^n} + b_1 \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + b_n x = a_0 \frac{d^m y}{dt^m} + \dots + a_m y \quad (6)$$

such a transfer function has the following form:

$$W(s) = \frac{a_0 s^m + a_1 s^{m-1} + \dots + a_m}{s^n + b_1 s^{n-1} + \dots + b_n}. \quad (7)$$

The transfer function of a nonstationary system is considered similarly to the concept of a stationary system. Let the external pulse $\delta(t - u)$ act on the input of the nonstationary linear system, which is further amplified by the coefficient e^{su} (modulated complex gain), then the response of the system can be written as $\exp su * w(t - u)$. Applying the superposition principle, we have:

$$\int_{-\infty}^t \exp(su) \delta(t - u) du = \exp st;$$

$$\int_{-\infty}^t \exp(su) w(t - u) du = \exp st \int_0^{\infty} \exp(s\tau) w(\tau) d\tau.$$

The transfer function $W(s)$ for $Re(s) > c_0$ is the ratio of $x(t)/y(t)$ in the process caused by the "action" $y(t) = \exp(st)$, see formula (6). The transfer function of a nonstationary system for a fixed time is defined as the Laplace transform with respect to the argument τ of the function describing the output quantity that is a response to a unit pulse with a delay of τ . In a nonstationary process, the difference is the dependence of the transfer function on the time t as a parameter. The transfer function of a stationary system is analytically expressed in terms of the coefficients of the oscillation equation (6). For a nonstationary system, therefore, the transfer function can not be expressed, and it is calculated only approximately [1].

There are few approaches for determining the transfer functions of dynamical systems. The methods most

widely used in acoustic problems are based on the connection between the transfer function and the impulse response function, in particular the method expressing the impulse response function through the roots of the generalized characteristic equation [10; 15]. In this case, an approximate expression of the transfer function is obtained in the form of a fractional-rational function with clearly expressed poles. Another method of calculating the transfer function is to expand the impulse response function into a formal power series. The coefficients of the Taylor series are analytic functions. Both methods are applied under the condition that the oscillation equation is given in the interval $(-\infty, T)$.

The response of acoustic dynamic systems to external influences differs from the exciting force. One of the characteristics is the moment of application of the impact, which can be remote to minus infinity or finite. In this case, time start is $t = 0$.

The reaction of the system can be determined in the following cases:

- if the impulse response function of the system $w(t, u)$ is known and the external action $y(t)$, which causes a definite reaction, this reaction can be calculated using the convolution integral;
- if the external action can be transformed according to Laplace, the dependence describing the output quantity can be described using the transfer function of the system;
- if the transfer function and the “left” Laplace transform of the input action are known [15].

Also, the system response is calculated using the equation of oscillations and frequency characteristics. The latter method is applied if the frequency characteristics of the system are known. Then, when calculating the response to an external action, it is appropriate to use Fourier transforms [10].

The frequency characteristics of *non-stationary systems* are functions of two variables: frequency and time. The complex frequency response is equal to the ratio of the output value of the system or the dynamic link to the external action, if the response of the system satisfies the condition

$$\int_0^{\infty} |w(t, t - \tau)| d\tau < \infty. \quad (8)$$

If the process is considered in a finite time interval, then the oscillation equation must be defined on an infinite interval adjoining to the left. To determine the complex frequency response, it is sufficient to calculate the transfer function and make a substitution: $s = i\omega$. The task of determining the frequency characteristics of *non-stationary* systems differs from stationary by doubling of independent variables, for example, when showing characteristics graphically, which is associated with the construction of each curve for a certain time.

The experimental determination of frequency characteristics. The frequency characteristics of the system are defined as the characteristics of the transfer function section for the values of the argument $s = i\omega$. The complex frequency function [2; 5; etc.] is the section $C(\omega, t)$ of the transfer function $W(i\omega, t)$:

$$C(\omega, t) = W(i\omega, t). \quad (9)$$

The transfer function of a linear dynamic system or a complex frequency response, as well as a transient response, fully reflect the response of the system to external influences. Let a harmonic signal be applied to the input of the linear link

$$x = A(x) \sin \omega t,$$

where $A(x)$ is the amplitude; ω is an angular frequency of this influence.

At the output of the link at the end of the transient process, harmonic oscillations of the same frequency are represented by the dependence

$$y = A(y) \sin(\omega t + \varphi),$$

where $A(y)$ is the amplitude of the steady state oscillations; φ is the phase shift between input and output oscillations.

For a fixed amplitude of the input oscillations, the amplitude and phase of the steady-state oscillations at the output of the link are a function of the frequency of these oscillations. The analytical dependences $A(\omega)$ and $\varphi(\omega)$ are called the amplitude and phase functions. Amplitude and phase frequency characteristics are often combined into one: amplitude-phase frequency response (APFF). In this case, APFF is constructed in the complex plane, where the abscissa axis is the axis for the real part $Re[W]$ of the transfer function of the link, and the ordinate axis for its imaginary part $Im[W]$. The frequency response can be presented in exponential form. Let at the input of the linear link be a signal of the form $x = A(x)\exp(i\omega t)$, and at the output the amplitude of the oscillations changes from it and the harmonic receives a phase shift $y = A(y)\exp(i\omega t + \varphi)$. In general terms

$$C(\omega, t) = |A(\omega, t)| e^{i\varphi(\omega, t)}, \quad (10)$$

where $|A(\omega, t)|$ is the amplitude frequency response; $\varphi(\omega, t) = \arg F(\omega, t)$ is a phase frequency response.

The steady-state reaction of the stationary system to the considered action is also harmonic and with the same frequency. The amplitude and phase of the oscillations change. In this case, the ratio of the amplitude of the output quantity to the amplitude of the input action is equal to the value of the amplitude-frequency response (AFR) at the value of the argument, which coincides with the frequency of the action of ω . Thus, the phase shift between the output signal and the external action is equal to the value of the phase frequency characteristic of the dynamic link at a value of ω . If the oscillation equation is known, then the expression of the frequency characteristics through its coefficients is realized on the basis of formula (1) in the following form:

$$C(\omega) = \frac{a_0 i\omega^m + \dots + a_m}{(i\omega)^n + b_1 (i\omega)^{n-1} + \dots + b_n}. \quad (11)$$

In the case when the free oscillations of the system are undamped under some initial conditions, the frequency characteristics lose the physical meaning considered above, but the relation in the form of formula (11) with the coefficients of the oscillation equation remains valid.

The experimental determination of the frequency characteristics is based on the equality of the complex frequency response to the ratio $x(t)/y(t)$ under the external action $y(t) = \exp(i\omega t)$ and the fulfillment of the condition (11).

To do this, it is necessary that the time interval during which the process is analyzed is limited to the left and that the response to the harmonic effect of the link is also limited in an infinite time interval. In gas-dynamic experiments, as a rule, the first condition is satisfied. Suppose that condition (11) is also satisfied. Also, a necessary condition for the experiment is multiple repeatability of results in the absence of external influences, except for one specially organized harmonic effect of a given frequency from the frequency interval determined by the sensitivity of the system to harmonic effects. Let t be the time counted from the beginning of the process studied, and $[0, T]$ is the time interval at which the particular experiment (process) takes place. The initial conditions for this process should be able to vary widely. Then, in order to obtain the frequency characteristics of the system or link, it is sufficient to record changes in the output quantity in the interval $[0, T]$ in processes caused by the effects

$$y'_i(t) = a_i \cos \omega_i t; \quad y''_i(t) = a_i \sin \omega_i t, \quad i = 1, 2, \dots, m,$$

for arbitrarily chosen amplitudes and frequencies from the range $[\Omega_1, \dots, \Omega_n]$ under the corresponding initial conditions. If the initial conditions for the experiment can be extended to the interval $(-\infty, 0)$, then they are computed. If the processes in the system with the coefficients of the oscillation equation frozen at the time $t = 0$ are asymptotically stable with respect to the output signal, then the option of additional definition is the assumption of stationarity of the system for $t < 0$, while the coefficients of the oscillation equation are equal to the frozen values. For example, if the external harmonic effect on the investigated link has the form $a_i \cos \omega_i t$, then the steady-state reaction is an expression

$$x(t) = a_i A(\omega_i) \cos[\omega_i t + \Theta(\omega_i)], \quad (12)$$

where $A(\omega)$ and $\Theta(\omega)$ are the amplitude and phase frequency characteristics of the stationary system used to extend the system.

Then from formula (12) it follows that

$$x(0) = a_i A(\omega_i) \cos \Theta(\omega_i), \quad (13)$$

$$d^{2k-1}x/dt^{2k-1} \Big|_{t=0} = (-1)^k a_i \omega_i^{2k-1} A(\omega_i) \sin \Theta(\omega_i),$$

$$d^{2k-1}x/dt^{2k-1} \Big|_{t=0} = (-1)^k a_i \omega_i^{2k} A(\omega_i) \cos \Theta(\omega_i),$$

$$k = 1, 2, \dots, \frac{n}{2}. \quad (14)$$

Another option to extend the system is to equate the coefficients of the right-hand side of the oscillation equation with zero. In this case, the frequency characteristics can not be used to obtain the response of the link to the pulse. The frequency characteristics obtained with different variants of pre-determination will be different.

For stationary systems and systems with periodically changing parameters, one can do without calculating the initial conditions, taking them into account by appropriate organization of the experiment. To do this, the frequency characteristics should be removed after the expiration of the practical attenuation of free oscillations. The reaction of the system in this case is of a steady nature, and the output value (or output signal) will vary with a period equal to the external action. The frequency characteristics of stationary systems will not depend on time, and the

characteristics of systems with periodically changing parameters will depend on the time with the period of variation of the coefficients of the oscillation equation. In this case, the obtained characteristics are extrapolated on the interval of time preceding the moment of establishment of the system reaction, which is equivalent in the experiment to the input of the initial conditions in accordance with the analytical extension of definition. In combustion chambers and LRE gas generators, the effects of capacitance and inertia can vary with time and determine the tendency of the system to pulsations with some characteristic frequencies. With an external effect on the dynamic system and after its removal, the response of the system, the establishment or damping of oscillations, is characterized by its transient response. The steady-state and transient processes are determined by the complex transmission coefficient K_T , which can be represented as the ratio of the signal at the output $\hat{s}_2$ from the system to the sinusoidal signal at its input $\hat{s}_1$:

$$K_T = \hat{s}_2 / \hat{s}_1 = K_{\text{nep}}(\omega) e^{-i\varphi(\omega)} = \text{Re} \left| \bar{K}_T(\omega) \right| + i \text{Im} \left| \bar{K}_T(\omega) \right|. \quad (15)$$

Here $\text{Re} \left| K_{\text{nep}}(\omega) \right|$, $\text{Im} \left| K_{\text{nep}}(\omega) \right|$ are the real and imaginary parts of the transmission coefficient.

The absolute value of the transmission coefficient characterizes the reaction of attenuation or amplification of the input sinusoidal signal, and its phase determines the shift. The connection between the shape and duration of the pulse and its spectrum is realized in practice using filters with a narrow bandpass. The signal is represented as the sum of the harmonic components. The filter integrates the signal over a time interval T approximately equal to the reciprocal of the bandpass of the filter Δf . If the main process period is greater than $T = 1 / \Delta f$, then the signal spectrum at the filter output will be the same as the envelope spectrum of the signal $\hat{s}(t)$ at the input [10; 12; 15]. Fourier integral for large values of the period T represents the spectrum of the signal $S'(\omega)$ in the form

$$S'(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-i\omega t} dt \quad (16)$$

from here its backward transformation gives

$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S'(\omega) e^{-i\omega t} d\omega. \quad (17)$$

A rectangular pulse has an infinitely wide spectrum. It follows from the property of the mutual correspondence of the time function and its spectrum that the bounded spectrum can only be of a function that slowly falls to zero value with the passage of time. It is found out that in the frequency domain, where the normalized frequency is less than $1/2$ (half-period is less than the correlation interval), the spectrum has an approximately constant amplitude, and with a further increase in frequency, the spectral amplitudes decrease rapidly to zero. It follows that the energy of the process is mainly concentrated in the frequency range from 0 to $f = 1/t_{\text{cp}}$, where t_{cp} is the average pulse duration equal to the ratio of the pulse area to its amplitude.

To determine the relations between the real and imaginary parts of the transfer function, we consider the

excitation of the system by the step function $\sigma_0(t)$, whose amplitude is zero for $t < 0$. The spectral density of such a function has the form

$$S'(\omega) = 1/i\omega_A. \quad (18)$$

Here $\omega_A = \omega + i\delta$, $\delta > 0$ of positive values t и $\omega_A = \omega - i\delta$ for negative ones; δ – any small quantity.

The signal at the output of the system can be represented by a transition function or a characteristic of the system [10; 12; 15; 16]:

$$\sigma'_0(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty-i\delta}^{\infty-i\delta} [\bar{K}_T(\omega)/i\omega] e^{i(\omega t - \varphi(\omega))} d\omega. \quad (19)$$

The way of integration can be closed in the upper half-plane for positive values of t and a semicircle in the lower plane for negative t . For a step function, the transmission factor is one. For the real system when $\omega \rightarrow \infty$, the transfer coefficient $\bar{K}_T(\omega)/i\omega(\omega) \rightarrow 0$, and its time derivative also tends to zero [15]:

$$\frac{\partial \sigma'_0(t)}{\partial t} = \int_{-\infty-i\delta}^{\infty-i\delta} \bar{K}_T(\omega) e^{i\omega t} d\omega = 0, \quad t < 0. \quad (20)$$

Let the transmission coefficient be in the form $\bar{K}_T(\omega) = K_1(\omega) + iK_2(\omega)$, assuming $\delta \rightarrow 0$ and replacing t by $-t$ in formula (20), we obtain the relation between the real and imaginary parts of the transmission coefficient:

$$\int_{-\infty}^{\infty} K_1(\omega) \cos \omega t d\omega = - \int_{-\infty}^{\infty} K_2(\omega) \sin \omega t d\omega > 0. \quad (21)$$

If we know the real part, we can calculate the imaginary, and vice versa.

Under the assumption that the functions of four-terminal network are rational, in a number of papers [5; 6; 10; etc.] the relations between their real and imaginary parts are obtained, according to which it is easy to calculate the impedances or conductivities of the contours under study.

There are different methods for calculating the damping decrement [2; 3; 5; 6; 10; 14–16]. One of the methods measures the sweep of oscillations during one cycle and determines the time interval between the onset of the disturbance and the period of oscillation being analyzed.

The operation for other time points is repeated and the amplitude variation graph in time is constructed. The slope of the graph of $A(t)$ characterizes the damping decrement. According to another technique, the pressure transducers are passed through a logarithmic amplifier and the amplitude levels are fixed, then the attenuation decrement is determined from the envelope of the pressure pulsations. Both methods for unfiltered pulsation readings allow us to determine the rate of attenuation of all pressure fluctuations. If it is necessary to determine the characteristics of the oscillations for a particular frequency, the pressure transducer should be passed through the filter and then the rate of damping of the oscillations is determined. For filtering, it is desirable to reproduce the signal in the reverse mode, in this case only the last 3, 4 periods of damped oscillations are distorted. The inclined straight line approximating the periodic dependence characterizes the magnitude of the damping decrement. To determine the experimental values of the vibration decrement the following methods can also be applied: spectral, correlation, amplitude and instantaneous method [1; 12]. The amplitude method and the method of the instantaneous period almost did not get used in practice. In experimental studies of the working process stability in liquid rocket engines [1; 3; 12], spectral and correlation methods were most widely used. The decrement of oscillations according to the spectral method is determined from the width of the signal power spectrum, fig. 3.

To detail the complex oscillation process in real combustion chambers, the spectral width is taken into account by means of a specific filter Δ_f of the spectro-analyzer. A three-point method is used in the algorithm [1; 3; 10; 12], and the method takes into account the dependencies of the left and right ascents, background and other interference, relative to the calculated point. At the same time, the pair of points near the maximum is searched, and a pair of those points is chosen, which yields the minimum sum of the magnitude of the decrement and its calculated spread. The correlation method is used to calculate the decrement from the magnitude of the decay rate of the interrelationship function, an approximate calculation scheme is shown in fig. 4.

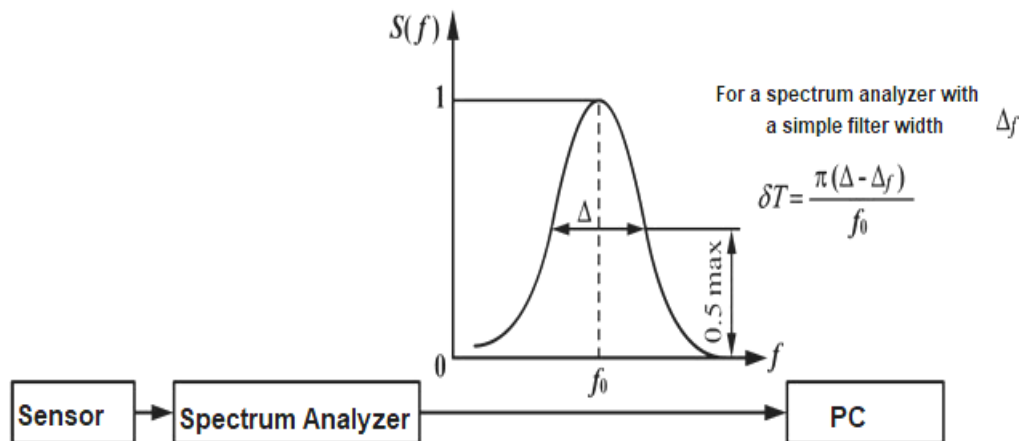


Fig. 3. The scheme for determining the decrement of oscillations by the spectral method

Рис. 3. Схема определения декремента колебаний по спектральному методу

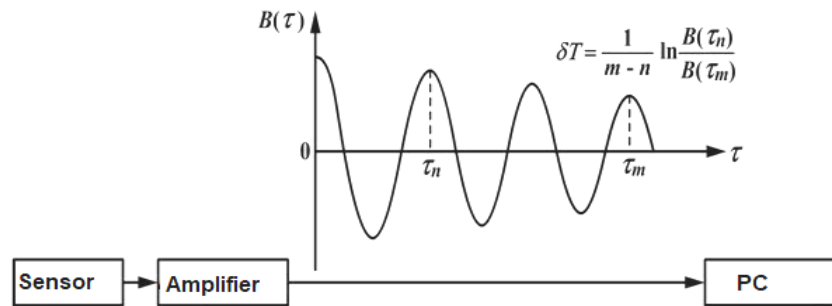


Fig. 4. The scheme for determining the decrement of oscillations from the magnitude of the decay rate of the interrelationship function

Рис. 4. Схема определения декремента колебаний по величине скорости затухания взаимокорреляционной функции

The EDD (external disturbing device) and EID (external impulse device) must provide the following [12]:

- a) the correspondence of the disturbing amplitude of the most frequently observed natural pressure pulses in combustion chambers or gas generators;
- b) the spectral composition of the pulse must have such a distribution of energy over the frequencies that would ensure that excitation in the combustion chamber (as an acoustic resonator) of pressure fluctuations of sufficient intensity in the required frequency region;
- c) the possibility of changing the amplitude in the desired range and the stability of the characteristics during a repeated disturbance, as well as providing a series of periodic pulses;
- d) ensure the introduction of disturbances for a wide range of operating pressures in the chamber or gas generator, as well as in the operation of the gas generator with an oxidizing environment.

At the same time, there are some operating restrictions imposed on EID, for example: the minimum possible diameter of the input port for introducing disturbances in order to reduce the effect on the integrity of the combustion chamber, as well as the minimum dimensions and resistance to high temperatures, vibrations, etc.

The most important is the choice of the place of the disturbance input. The answer to this question can be found from the prediction of the mode and the frequency of the natural oscillations of the path. An important fact is the method of optimal processing of experimental data, which provides sufficient accuracy and reliability of the obtained values of the damping decrement. The criterion for the adequacy of the stability margin for "hard" excitation [1–3; 5–14] is provided if the pressure oscillations after the pulse rapidly decay and a certain ratio is established between the initial peak deviation of the pressure from the mean and total high-frequency signal to the perturbation input. It is stated [3; 12] that in order to evaluate the stability of the working process to finite disturbances, it is required:

- introduce a pressure pulse in the range $15A_{sv} < A_m < 25A_{sv}$;
- determine the relaxation time of the process t_r , here A_m is the average value of the absolute maximum of the pulse;
- A_{sv} is the average rectified value of natural noises pulsations;

– $t_r = t_{1B} + t_b$ is the total relaxation time of the working process;

- t_{1B} is the time of action on the working process of the first disturbance wave;
- t_b is the time of decrease in the amplitude of pressure oscillations by e times.

The combustion chamber is supposed to be stable to finite disturbances [3; 10; 12], if the relaxation time is $t_r < 15$ ms.

Further, it should be noted that in testing of full-scale motors, it is necessary to evaluate the decrements and the spectra of pressure oscillations, both before the introduction of disturbance and after damping of the oscillations. Decrements of pressure fluctuations and spectra should not differ within the limits of measurement accuracy. A significant difference will mean the instability of the working process.

Conclusion. The algorithm is proposed for estimating reserves of stability towards the high high-frequency pressure oscillations in gas-generators and combustion chambers of liquid rocket engines, which means spectral processing of the combustion process reaction to pulsed artificial disturbances. In contrast to pyro cartridges, which are now used to create pulses with different gas pressure amplitudes in combustion chambers, electric pulse disturbing devices have been developed. They reduce the risk of damage to the components of LRE units in full-scale and model tests, and have an obvious prospect for widespread use.

References

1. Dvigateli raketnye zhidkostnye. *Metodika ocenki vysokochastotnoj ustojchivosti rabochego processa. OST V92-9000-78* [Liquid propellant engines. Method for assessing the high-frequency stability of the working process, Industry Standart V92-9000-78], NIIXimmash, 1978, 105 p.
2. Liquid propellant rocket combustion instability. Editor David T. Harrje, associate Editor Frederick H. Reardon. National aeronautics and space administration, Washington, 1972, 637 p.
3. Shibanov A. A., Pikalov V. P., Sajdov S. S., Pod red. d-ra tehn. nauk K. P. Denisova. M. *Metody fizicheskogo modelirovaniya vysokochastotnoy neustoychivosti rabochego processa v zhidkostnyh raketnyh*

dvigatelyah [Methods of physical modeling of high-frequency instability of the working process in liquid-fuel rocket engines], Moscow, Mashinostroenie, Mashino stroenie – Polet Publ., 2013, 512 p.

4. Narizhnyj A. A., Pikalov V. P., Carapkin R. A., *Generator impul'sov davleniya v akusticheskikh polostyakh kamer sgoraniya i generatorov zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [A generator of pressure pulses in the acoustic cavities of combustion chambers and generators of liquid rocket engines], Patent RF № 2523921, 31.05.2013.

5. Lebedinskij E. V., Kalmykov G. P., Mosolov S. V. et al. *Rabochie processy v zhidkostnom raketnom dvigatele i ih modelirovanie* [Work processes in a liquid rocket engine and their modeling], Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008, 511 p.

6. Lebedinskij E. V., Lozino-Lozinskaja I. G., Merkulov I. V. et al. *Akusticheskie sredstva bor'by s neustoychivost'yu gorenija* [Acoustic means to combat the instability of combustion], Moscow, Centr Keldysha Publ., 2004, 205 p.

7. Mosolov S. V., Birjukov V. I. [Anti-pulsation partitions as a means of suppressing acoustic oscillations in the chambers of liquid rocket engines]. *Vestnik mashinostroeniya*. 2011, no. 11, P. 6–11 (In Russ.).

8. Mosolov S. V., Birjukov V. I. [Hydrodynamic methods for ensuring the stability of the working process in combustion chambers of liquid rocket engines]. *Vestnik mashinostroeniya*. 2011, no. 12, P. 12–17 (In Russ.).

9. Birjukov V. I., Belaja A. Ju. [Ensuring the stability of the working process in the combustion chamber of liquid rocket engines]. *Vestnik Moskovskogo aviacionnogo instituta*. 2011, Vol. 18, no. 3, P. 110–115 (In Russ.).

10. Birjukov V. I., Mosolov S. V. *Dinamika gazovykh traktov zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Dynamics of gas paths of liquid rocket engines]. MAI Publ., 2016. 168 p.

11. Mosolov S. V., Biryukov V. I. Maintenance of Operational Stability in Liquid-Propellant Rocket Engines by Adjusting the Acoustic Properties of the Combustion Chambers. *Russian Engineering Research*. 2013, Vol. 33, no. 6, P. 313–318.

12. Dranovsky M. Combustion Instabilities in Liquid Rocket Engines: Testing and Development Practices in Russia, Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, Reston, Virginia, 2007. 221 p.

13. Liquid Rocket Engine Combustion Stabilization Devices. USA, Nasa Space Vehicle Design Criteria (Chemical Propulsion), 1974. SP 8113. 127 p.

14. Yang V., Anderson W. Liquid Rocket Engine Combustion Instability, Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, Washington, D. C., 1995. p. 169.

15. Skuchik E. *Osnovy akustiki*. [Fundamentals of Acoustics]. Moscow, Mir Publ., 1976, 542 p.

16. Barabanov S. A., Birjukov V. I. [Attenuation of forced oscillations and hydrostatic waves in the turbulent flow of extended tracts of power systems for liquid rocket engines] *Vestnik SibGAU*. 2015, Vol. 16, no. 2, P. 386–394 (In Russ.).

2. Liquid propellant rocket combustion instability / Ed. David T. Hartje, associate Ed. Frederick H. Reardon ; National aeronautics and space administration. Washington, 1972. 637p.

3. Шибанов А. А., Пикалов В. П., Сайдов С. С. Методы физического моделирования высокочастотной неустойчивости рабочего процесса в жидкостных ракетных двигателях / под ред. д-ра техн. наук К. П. Денисова. М. : Машиностроение. Машиностроение – Полет, 2013. 512 с.

4. Пат. № 2523921 Российская Федерация от 31.05.2013 г. Генератор импульсов давления в акустических полостях камер сгорания и генераторов жидкостных ракетных двигателей / Наризный А. А., Пикалов В. П., Царапкин Р. А. Опубл. 27.07.2014, Бюл. № 21.

5. Рабочие процессы в жидкостном ракетном двигателе и их моделирование / Е. В. Лебединский [и др.]; под ред. А. С. Коротеева. М. : Машиностроение, 2008. 512 с.

6. Акустические средства борьбы с неустойчивостью горения / Е. В. Лебединский [и др.]. М. : Изд-во ФГУП «Центр Келдыша», 2004. 205 с.

7. Мосолов С. В., Бирюков В. И. Антипульсационные перегородки как средство подавления акустических колебаний в камерах жидкостных ракетных двигателей // Вестник машиностроения. 2011. № 11. С. 6–11.

8. Мосолов С. В., Бирюков В. И. Гидродинамические способы обеспечения устойчивости рабочего процесса в камерах сгорания жидкостных ракетных двигателей // Вестник машиностроения. 2011. № 12. С. 12–17.

9. Бирюков В. И., Белая А. Ю. Обеспечение устойчивости рабочего процесса в камере сгорания жидкостных ракетных двигателей // Вестник Московского авиационного института. 2011. Т. 18, № 3. С. 110–115.

10. Бирюков В. И., Мосолов С. В. Динамика газовых трактов жидкостных ракетных двигателей. М. : Изд-во МАИ, 2016. 168 с.

11. Mosolov S. V., Biryukov V. I. Maintenance of Operational Stability in Liquid-Propellant Rocket Engines by Adjusting the Acoustic Properties of the Combustion Chambers // Russian Engineering Research. 2013. T. 33, № 6. С. 313–318.

12. Dranovsky M. Combustion Instabilities in Liquid Rocket Engines: Testing and Development Practices in Russia, Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, Reston, Virginia, 2007. 221 p.

13. Liquid Rocket Engine Combustion Stabilization Devices / Nasa Space Vehicle Design Criteria (Chemical Propulsion). USA, 1974. SP 8113. 127 p.

14. Yang V., Anderson W. Liquid Rocket Engine Combustion Instability, Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, Washington, D. C., 1995. P. 169.

15. Скучик Е. Основы акустики. М. : Мир, 1976. Т. 2. 542 с.

16. Барабанов С. А., Бирюков В. И. Затухание вынужденных колебаний и гидроударных волн в турбулентном потоке протяженных трактов систем питания жидкостных ракетных двигателей // Вестник СибГАУ. 2015. Т. 16, № 2. С. 386–394.

Библиографические ссылки

1. Двигатели ракетные жидкостные. Методика оценки высокочастотной устойчивости рабочего процесса: ОСТ В92-9000–78 / НИИхиммаш, 1978. 105 с.

© Biryukov V. I., Nazarov V. P., Tsarapkin R. A., 2017

AUTOMATED WEIGHT COMPENSATION SYSTEM FOR GROUND-BASED TRYOUT OF SPACE VEHICLE SOLAR PANELSA. G. Verhoglyad¹, V. A. Kuklin^{2,3}, S. N. Makarov¹, V. M. Mihalkin^{2,3}, V. I. Halimanovich^{2,3}¹Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering of SB RAS
41, Russkaya Str., Novosibirsk, 630058, Russian Federation²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

³JSC “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”

52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

E-mail: verhog@tdisie.nsc.ru

In the process of ground-based tryout of solar panels placed aboard the spacecraft there appears the problem of gravity effect compensation. The energy of deployment mechanism is extremely limited, the weight and strength of the structure being calculated for weightlessness conditions. Therefore, under the force of gravity, the power of deployment drives may not be enough to complete the tryout, and the structure itself may be destroyed. Taking into account these difficulties, specialized stands the main part of which is the so-called weight compensation system are designed and created to conduct ground-based pilot tryout. Active weight compensation systems are most effective in this case.

In the stands with active weight compensation systems all forces generated by the stand and movements of the stand parts occur through controlled drives. By introducing various sensors into the weight compensation system and by the use of their signals for generation of controlling actions in the control system it becomes possible to significantly increase the level of gravity effect compensation, as well as to minimize the influence of the stand parts inertia.

The paper presents the results of the designing, building and testing of the automated active weight compensation system for solar panels. The system provides weight compensation when conducting ground-based experimental tryout of any objects (solar panels, rods, multi-tier spokes, etc.) having a long and transformable in one direction form for distances of the order of 20 m (longitudinal direction). This system also provides movement of the pieces of a tested object in the transverse direction and in height for distances of up to 5 m.

The results of departmental tests showed that the weight compensation system with specified parameters described in this paper allows for ground-based tryout of the deployment of solar panels of all constructions, both currently existing and being developed for the future.

Keywords: solar panel, spacecraft, active weight compensation system, efficiency of the weight compensation system.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 3. С. 567–574

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОБЕЗВЕШИВАНИЯ ДЛЯ НАЗЕМНОЙ ОТРАБОТКИ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВА. Г. Верхогляд¹, В. А. Куклин^{2,3}, С. Н. Макаров¹, В. М. Михалкин^{2,3}, В. И. Халиманович^{2,3}¹Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН
Российская Федерация, 630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31³АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

E-mail: verhog@tdisie.nsc.ru

В процессе наземной отработки солнечных батарей, размещаемых на борту космических аппаратов, возникает проблема компенсации влияния силы тяжести. Энергетика механизма раскрытия чрезвычайно ограничена, а вес и прочность конструкции рассчитываются на условия невесомости. Поэтому в условиях действия силы тяжести мощности приводов раскрытия может не хватить для полноценной отработки, а сама конструкция, как крайний случай, может быть разрушена. Учитывая данные сложности, для проведения наземной экспериментальной отработки разрабатываются и создаются специализированные стенды, основной частью которых являются так называемые системы обезвешивания. Наиболее эффективными в данном случае являются активные системы обезвешивания.

В стендах с активными системами обезвешивания все силы, генерируемые в стенде, и перемещения составных частей стенда происходят за счет управляемых приводов. Путем введения в конструкцию системы обезвешивания различных датчиков и использования их сигналов для выработки управляющих воздействий в системе управления удастся значительно повысить степень компенсации влияния силы тяжести, а также минимизировать влияние инерционности частей стенда.

Представлены результаты разработки, создания и испытаний автоматизированной активной системы, предназначенной для обезвешивания солнечных батарей. Созданная система обеспечивает обезвешивание при проведении наземной экспериментальной отработки любых объектов (солнечных батарей, штанг, многозвенных спиц и т. д.), имеющих протяженную и трансформируемую в одном направлении форму на расстояния порядка 20 м (продольное направление). Также данная система обеспечивает перемещение частей тестируемого изделия в поперечном направлении и по высоте на расстояния до 5 м.

Результаты ведомственных испытаний показали, что описанная система обезвешивания с указанными параметрами позволяет производить наземную отработку раскрытия солнечных батарей всех конструкций, как существующих в настоящее время, так и разрабатываемых на перспективу.

Ключевые слова: солнечная батарея, космический аппарат, активная система обезвешивания, эффективность системы обезвешивания.

Introduction. At present, in the process of space vehicles (SV) development one of the most important tasks is to increase their reliability and elongate their service life during the flight. The solution of this problem is impossible without comprehensive ground-based experimental testing (GET) of both the SV as a whole and its component parts. The greatest difficulties arise with GET of so-called large-scale transformable systems (LTS). LTS include: antenna-reflectors, solar panels (SP), various retractable rods, etc. The complexity of GET of such objects is due to their considerable size (often the linear dimensions of these objects exceed the dimensions of the SV tens of times), the energy of the mechanism of deployment (transformation) is extremely limited, the weight and strength of the structure being calculated for conditions of weightlessness. Therefore, under the action of gravity, the power of the deployment drives may not be enough for an adequate tryout, and the structure itself can be destroyed. Taking into account these difficulties, specialized stands the main part of which is the so called weight compensation system (WCS) [1–8] are being designed and created for carrying out GET.

The general idea of weight compensation is that special constructions compensate for the gravity forces acting on each of the non-transformable parts, and also compensate the moments created by the action of gravity on each such part. This can be achieved by applying to the center of mass of each non-transformable part a force equal to the weight of this part and directed strictly upward. But such a “trivial” solution does not always turn out to be constructively realizable. In general, the stand should provide a three-dimensional movement of parts of an object to be weight-compensated in an arbitrary direction, but often the features of the topology of the object being transformed are used to simplify the design of the stand, so either symmetry axes or selected directions appear [2].

When developing a WCS, the following main tasks are solved:

- choice of the method of compensation for gravity acting on the objects to be weight-compensated;
- ensuring the movement of the points of suspension of the object to be weight-compensated in space along the necessary trajectories;

- ensuring the independence of the weight-compensating forces during the movement of the suspension point;

- minimization or complete elimination of the inertia effect of the parts of the WCS on the operation of the mechanisms of a tested product.

In addition, some other tasks can be solved simultaneously: minimization of bending and other types of deformation of product designs, minimization of change in friction forces in hinges, etc.

Weight compensation systems can be divided into three types according to the way of solving the main tasks mentioned above:

- systems with a passive type of weight compensation [2; 3];
- systems with an active type of weight compensation [4];
- systems with an active-passive type of weight compensation [7; 8].

In systems of the first type, the parts of the product to be weight-compensated and the stand move under the action of movements and forces which are formed due to the energy of the product drives, the balance weights and the spring elements of the stand. The main disadvantage of such systems is the sharp complication of their design when the size of LTS increases and the practical impossibility of minimizing the effect of inertial properties of WCS on the operation of a tested product. As a rule, these systems are highly specialized and are intended for GET of the final set of products. Due to these shortcomings, the scope of application of such systems is limited to GET of relatively simple objects consisting of 2–3 elements and with relatively non-rigid requirements for compensation of gravity (usually, in statics, the error of compensation is several percent).

In stands with active systems of weight compensation all the forces generated in the stand and the movements of the component parts of the stand are due to controlled drives. In this case, by introducing various sensors into the design of the WCS and using their signals to generate controlling actions in the control system it is possible to significantly increase the degree of compensation for the effect of gravity, and also to minimize the influence of the inertia of the stand parts [9]. Structurally, such a system becomes much simpler. The disadvantages of these systems are the complexity of the control algorithms, large

labor costs for their development and high probability of self-oscillations.

In systems with an active-passive type of weight compensation, there are in some cases advantages and disadvantages of the systems of the first two types and the scope of their application, as that of passive systems, is limited.

Formulation of the problem. The purpose of this work was the development of an automated active weight compensation system for the deployment of extended products [10]. Weight compensation of a product can be provided only in two ways: the first one is hanging on suspenders with a movable suspension point and using mobile supports (an exotic case of immersion in a pool with dense liquid is not considered). In our case WCS with the use of a suspension system is structurally more convenient. This WCS must ensure weight compensation during GET of any objects (solar batteries, rods, multi-link spokes, etc.) having an extended and transformable in one direction form for distances of the order of 20 m (longitudinal direction). Also, this system should allow the parts of the tested product to be moved in the transverse direction and in height for distances up to 5 m [11]. Concrete specifications are given in table.

An important issue in conducting GET is the question of energy losses of the drives of a tested product deployment while overcoming the “parasitic” forces, which are the resistance forces in the WCS and an uncompensated part of the gravity force. These losses are due to the imperfection of the WCS design and the “non-ideal” operation of feedback and sensors in this system. A full account of all the differences in the ground-based experiment and the conditions of an orbital flight is hardly possible, and therefore a certain compromise solution was adopted on the methodology for determining losses, namely:

1. In each relatively short period of time (of the order of 0.1 seconds) it is considered that the instantaneous value of the speed of the part to be weight-compensated, its acceleration, the deviation from the vertical of the suspender on which this product is suspended are considered constant (i. e., the values of all “parasitic” forces which must be overcome by the deployment mechanism during the process of deployment are constant).

2. “Parasitic” work of the deployment system on this section – $A\pi_i$ is given by the expression:

$$A\pi_i = Fz_i \cdot \delta z_i + Fy_i \cdot \delta y_i + Fx_i \cdot \delta x_i,$$

where Fz_i, Fy_i, Fx_i are the values of the “parasitic forces” acting at i time moment on the weight-compensated part along the corresponding directions; $\delta z_i, \delta y_i, \delta x_i$ are the values of the displacements for the same moment of time. In this case, only those coordinates are taken into account, in the direction of which the forces of the deployment system act. Forces perpendicular to those created by the deployment drives create additional frictional forces in the hinges, which certainly need to be reduced, but the direct calculation of their effect on the losses is extremely complicated.

3. The total energy losses of the deployment drives for the extension of this part – $A\pi$ – are calculated as the sum of the “parasitic” works along the entire path of deployment of the part to be weight-compensated:

$$A\pi = \sum_{i=0}^N A\pi_i,$$

where N is the number of sections for the entire time of product deployment.

The total energy losses of the deployment drives are the sum of parasitic work moving each “non-transformable” part of the product to be weight-compensated.

Technical characteristics of WCS

№	Parameter name	Index
1	Number of independently weight-compensated parts (pieces), of which:	12
2	with mass up to 80 kg	3
3	with mass up to 35 kg	6
4	with mass up to 10 kg	3
5	Maximum speed of the parts to be weight-compensated, m/s: longitudinal transverse vertical	1 1 0.4
6	Maximum acceleration of the parts to be weight-compensated, m/s ² : longitudinal transverse vertical	0.5 0.5 0.2
7	Maximum travel of parts of the article to be weight-compensated, m: longitudinal transverse vertical	17 ±2 ±2.5
8	Energy losses of the drives of the tested product deployment system to overcome resistance in WCS and gravity, %, not more than	10

The stand and WCS construction. Due to the fact that the parts of tested products travel the distance of tens of meters (X coordinate) in one direction and are limited to the distance of a few meters in the other direction (Y – transverse, Z – vertical), the portal structure was taken as a basis. The portal was moved along the two guides with a toothed belt along X coordinate, the carriage was moved along the portal in the transverse direction and this carriage, in its turn, ensured the vertical moving of the object to be weight-compensated [12; 13]. The movement of the portal was due to the engagement of the gears of the portal support assemblies with the toothed belt. The drives that move around each coordinate were independent. The considerations for choosing the drives and the control system for their displacements were similar to those given in [14]. The error in compensation of the weight component was measured with the help of weight sensors, the data from which were transmitted to the control system via the radio channel. In X and Y axes, the delay signal (or the lead signal) of the portal and the carriage was the deviation of the suspension cable from the vertical. Directional X coordinates were located in 3 tiers (on each tier there were 3 portals). Particular attention was paid to the speed of the control system and the sensors of mismatch. The data acquisition period from all sensors and the control cycle time were 30 ms. Mitsubishi Electric equipment was adopted as an automation platform [15]. The exterior view of the portal with the carriage and WCS assembly is shown in fig. 1, *a*, *b*, respectively.

The WCS operation was tested during the weight compensation of a solar battery consisting of 3 panels and a frame (fig. 2). The objective function of the control system for the WCS drives was to minimize the deviations of suspension cables from the vertical and the deviation of the tension of the suspender cables from the set values. Because there was no motion of the SP in the vertical direction (it arose only because of inadequate parallel

alignment of the SP deployment direction and the WCS guides, and out-of-parallelism of the axes of the individual panels), the tests of WCS in the vertical direction were not fully carried out. In the operation of the WCS control system, the PID control algorithm was used [16; 17].

Experimental results and discussion of the obtained temporal dependencies during the deployment.

During the experiments, the PID regulator coefficients (gain factors in the WCS feedback loop) were selected from the condition of the absence of electromechanical resonances for various designs of the products being inspected and the conditions for their deployment. This condition was dictated by the strict requirement of mechanical safety of the product to be weight-compensated. Thus, a certain “safe” range of values of the PID regulator coefficients was determined. It was in this range of coefficients that experiments were carried out. After carrying out the experiments and processing their results, the following dependencies were obtained for each of the parts to be weight-compensated:

- the speed of movement of a given part along X axis as a function of time;
- speed of movement of a given part along Y axis as a function of time;
- the dependence of the parasitic energy losses of the SP deployment mechanisms when moving the panels along each of the coordinates.

Moving of an intermediate panel (it has the largest weight and a significant travel range) and the tip panel – it has the maximum displacement along X axis – is the most interesting. The movement of all the panels along Y axis practically did not affect the energy losses due to the small range of displacements. The dependencies obtained on the graphs are similar for each of the parts to be weight-compensated (they differ only in numerical values), so below in fig. 3–8 only the results for the tip panel are shown.

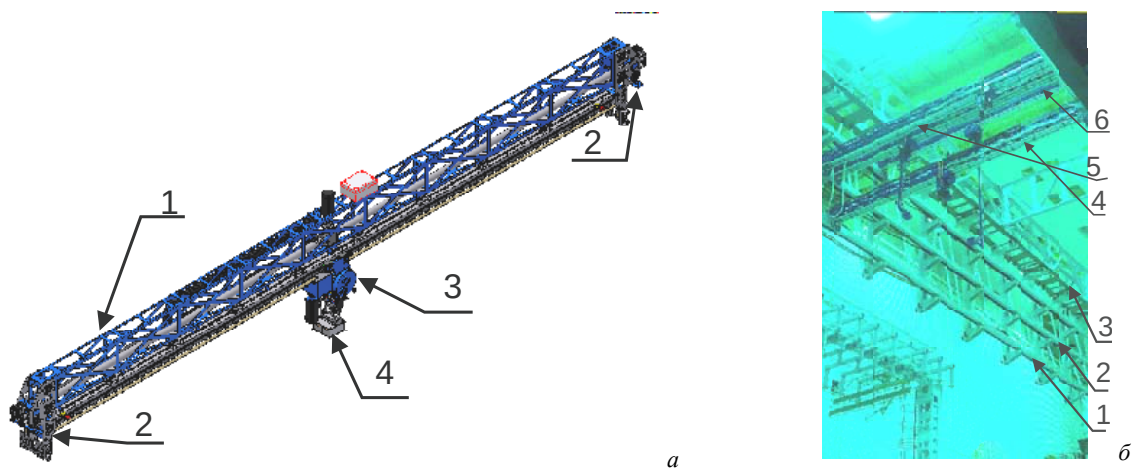


Fig. 1. WCS portal (*a*): 1 – portal body; 2 – support assembly; 3 – carriage; 4 – vertical displacement node with error sensors in X and Y coordinates; WCS in assembly (*b*): 1, 2, 3 – left guides (3 tiers); 4, 5, 6 – portals of three tiers

Рис. 1. Портал СО (*a*): 1 – корпус портала; 2 – опорный узел; 3 – каретка; 4 – узел вертикального перемещения с датчиками рассогласования по координатам X и Y ; СО в сборе (*б*): 1, 2, 3 – левые направляющие (3 яруса); 4, 5, 6 – порталы трех ярусов

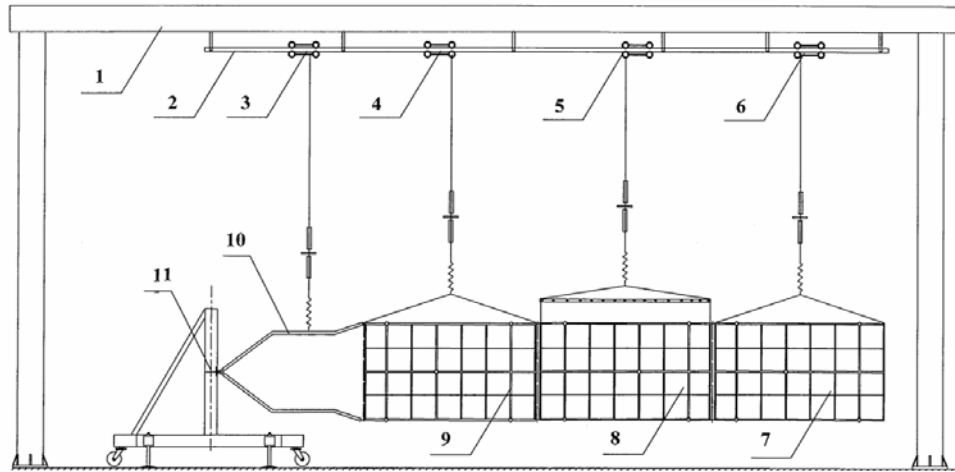


Fig. 2. Schematic representation of the deployed solar panel used in WCS tests:
 1 – load-bearing column; 2 – double guides; 3 – carriage with a sponder of a rod weight compensation; 4 – carriage with a sponder of an inboard panel weight compensation; 5 – carriage with a sponder of an intermediate package weight compensation; 6 – carriage with a sponder of a tip panel weight compensation; 7 – tip panel; 8 – intermediate panel; 9 – inboard panel; 10 – frame; 11 – IR satellite frame

Рис. 2. Схематичное изображение раскрытой солнечной батареи, используемой при испытаниях СО:
 1 – силовая колонна; 2 – двойные направляющие; 3 – каретка с вывеской обезвешивания штанги; 4 – каретка с вывеской обезвешивания корневой панели; 5 – каретка с вывеской обезвешивания промежуточного пакета; 6 – каретка с вывеской обезвешивания концевой панели; 7 – концевая панель; 8 – промежуточная панель; 9 – корневая панель; 10 – рама; 11 – рама ИК спутника

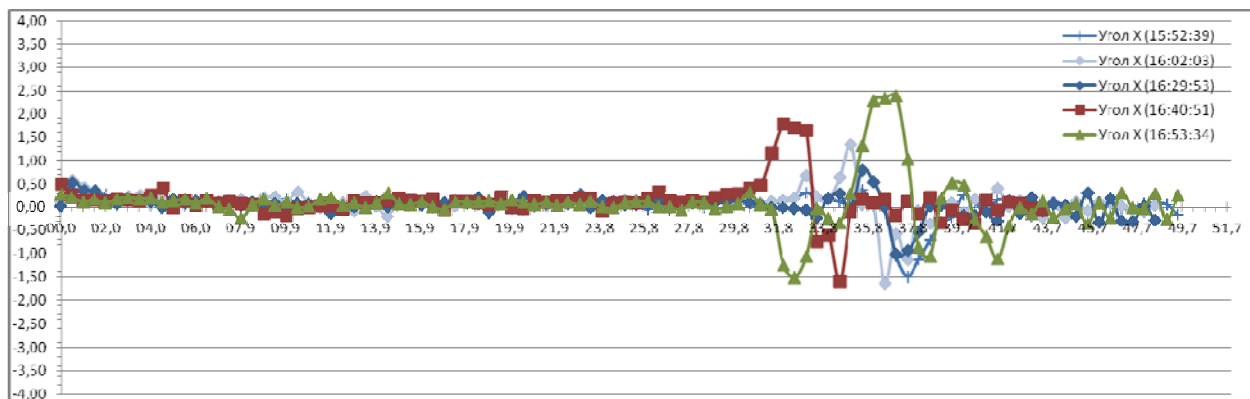


Fig. 3. Time dependence of the deviation angle of the tip panel sponder from the vertical in the direction of X axis (time is given in seconds, deviation – in degrees)

Рис. 3. Временная зависимость угла отклонения вывески концевой панели от вертикали в направлении оси X (время – в секундах, отклонение – в градусах)

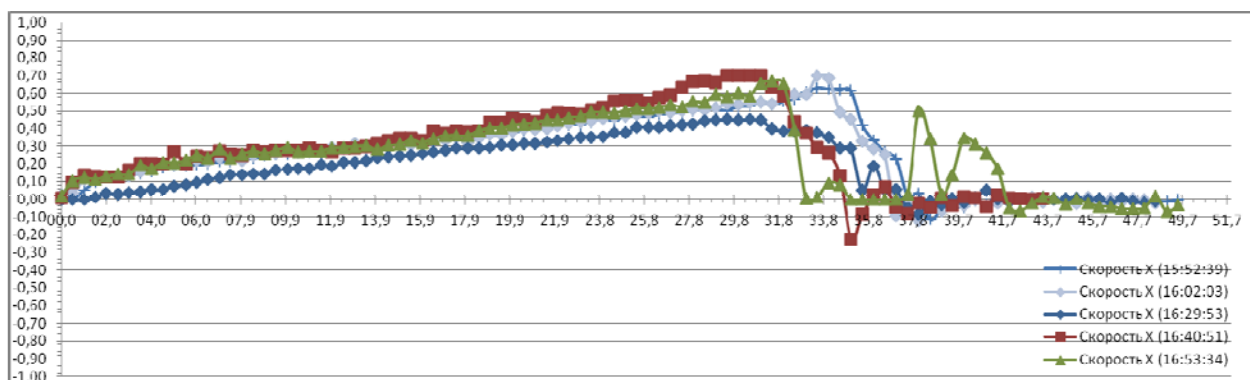


Fig. 4. Time dependence of the tip panel velocity in X direction

Рис. 4. Временная зависимость скорости движения концевой панели в направлении X

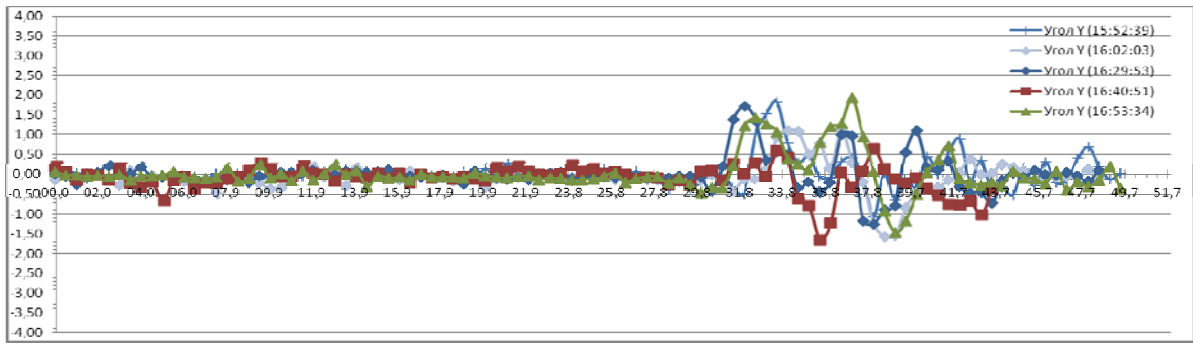


Fig. 5. Time dependence of the deviation angle of the tip panel suspender from the vertical in the direction of Y axis

Рис. 5. Временная зависимость угла отклонения вывески концевой панели от вертикали в направлении оси Y

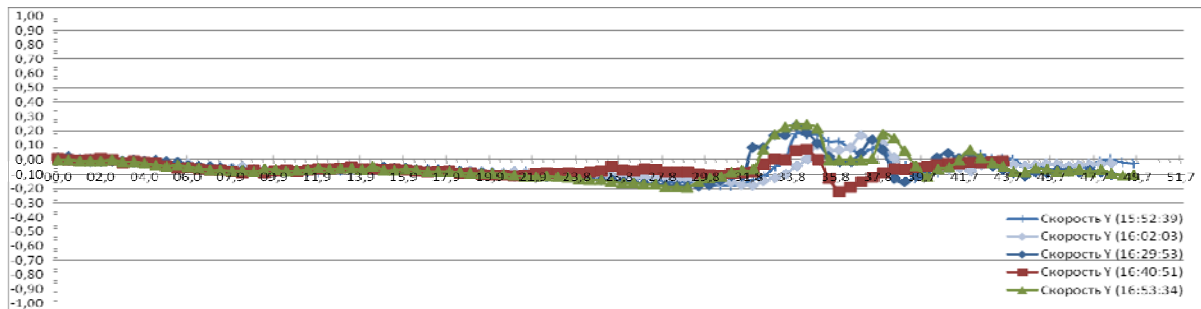


Fig. 6. Time dependence of the tip panel velocity in Y direction

Рис. 6. Временная зависимость скорости движения концевой панели в направлении Y

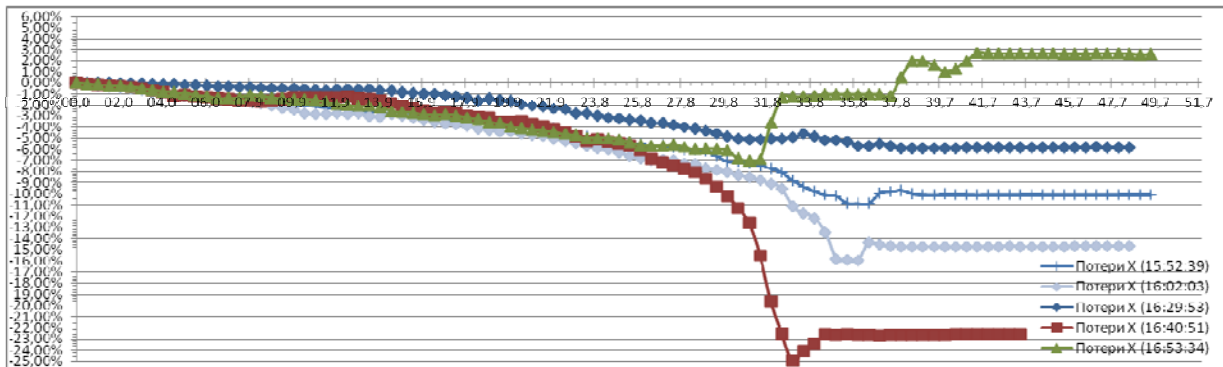


Fig. 7. Time dependence of the "parasitic" energy losses of the mechanism of opening the end panel (% of the energy stored in the mechanism) when moving in the X direction

Рис. 7. Временная зависимость «паразитных» потерь энергии механизма раскрытия концевой панели (% от энергии, запасенной в механизме) при движении в направлении X

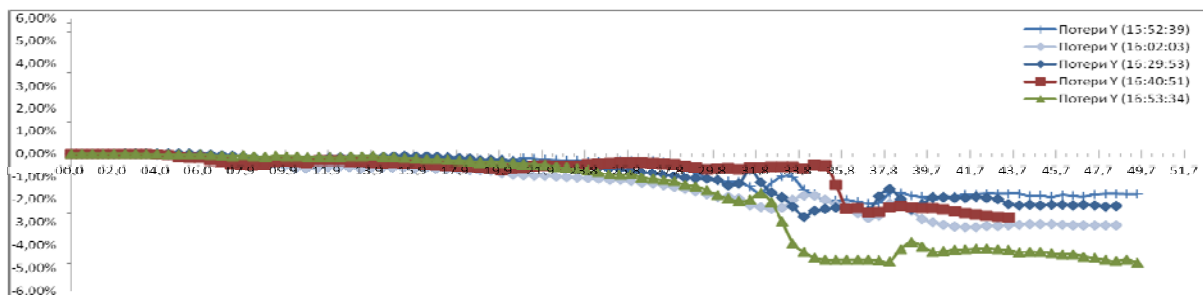


Fig. 8. The time dependence of the "parasitic" losses of energy of the tip panel deployment mechanism (% of the energy stored in the mechanism) when moving in Y direction

Рис. 8. Временная зависимость «паразитных» потерь энергии механизма раскрытия концевой панели (% от энергии, запасенной в механизме) при движении в направлении Y

The obtained graphs are correct within the framework of the considered model up to the moment of time 29.8–30 seconds. At this point, the “locking” mechanisms of solar panels start functioning and after their operation the movement of panels practically ceases, and accordingly the movement of portals and carriages ceases to be independent and part of the energy goes to the SP fastening system. But from the point of view of GET this moment is already of no interest, because the deployment is completed.

From the graphs obtained it can be seen that the “parasitic” energy losses slightly exceed the value of 10 %. These losses are due to the fact that practically throughout the SP deployment the angle of the suspender deviation remains constant and is about 0.05° . This value can be reduced by increasing the “integral component” in the coefficients describing the operation of the PID controller. This reduces the stability of the entire WCS. The way to set the target function of the suspender deviation angle as 0.05° instead of 0° seems to be much simpler. Due to the wide possibilities for changing the algorithms of the WCS control system there are other ways to reduce the “parasitic” energy losses of the deployment mechanisms.

The motion range of the panels along the vertical in the experiments was less than 30 mm and did not actually affect the energy losses. Nevertheless, the inclusion of the WCS mechanism which ensures the compensation of the deviations in the weight component made it possible to reduce this value by more than three times.

Conclusion. An automated active weight-compensation system for deployment of solar cells of space vehicles was developed, created and tested.

The results of departmental tests showed that the weight compensation system with specified parameters described in this paper allows for ground-based tryout of the deployment of solar panels of all constructions, both currently existing and being developed for the future.

References

1. Novozhilov D. A., Grebaus E. F., Belousova O. G. *Stend dlya modelirovaniya nevesomosti dvukhzvennykh mekhanizmov* [Stand for simulation of weightlessness dvukhzvennykh mechanisms]. Patent SSSR. SU 555314. 25.04.1977.
2. Vokhmin A. G., Podzorov V. N., Polevko I. B. i dr. *Ustroistvo dlya obezveshivaniya sektionnykh skladnykh panelei solnechnykh batarei kosmicheskogo apparata* [Device for weight compensation sectional folding solar panels of the spacecraft]. Patent RF. RU2299840, 20.09.2005.
3. Brand, Klingelhofer, Hoch (DE). Device for ground-based simulating of operations of a manipulator usable in space by means of a model of a space vehicle. Pat. US 5110294A. 5.05.1992.
4. Drozdov A. A., Agashkin S. V., Mikhnev M. M., Ushakov A. R. *Ustroistvo imitatsii nevesomosti mekhanizmov s gibkoi konstruktsiei* [Device simulating weightlessness mechanisms with flexible design]. Patent RF. RU 2334970, G01M19/00. FGUP “Nauchno-proizvodstvennoe ob’’edinenie prikladnoi mekhaniki im. Akademika M. F. Reshetneva”. 27.01.2008.
5. Kravchenko O. A. et al. *Silokompensiruyushchaya sistema* [Force compensation system]. Patent RF. 139984, MPK7 G09B9. 27.04.2014.
6. Kudryavtsev I. A. *Sposob imitatsii ponizhennoi gravitatsii* [Way to simulate low gravity]. Patent RF. 2454694, MPK7 B64G7/00, G01M 99/00. 27.06.2012.
7. Anuprienko G. E., Karpachev Yu. A., Kukhotskii L. M. et al. *Ustroistvo obezveshivaniya elementov* [Device for weight compensation of elements]. Pat. 1828261 RU A1 SU M. 20.09.96.
8. Hasselman, Quartararo (CA). Microgravity suspension system for simulating a weightless environment. Pat. US 5379657A. 10.01.1995.
9. Verkhoglyad A. G., Makarov S. N., Mikhalkin V. M., Stupak M. F., Shevlyakov A. V. [Automatic weightlessness system of large-size transformed constructions at opening]. *Izvestiya VUZov. Priborostroenie*. 2016, Vol. 59, No. 2, P. 134–142 (In Russ.).
10. Verkhoglyad A. G., Kuklin V. A., Makarov S. N. et al. [Weight compensation system for space vehicle solar panels factory testing]. *Reshetnevskie chteniya : XX yubilein. Mezhdunar. Nauch.-praktich. Konf., posvyashch. Pamyati gener. Konstruktora raket.-kosmich. Sistem akad. M. F. Reshetneva (Krasnoyarsk, 09–12 noyab. 2016 g.)* [Proceedings of the XX Intern. Scientific conference Reshetnev readings]. Krasnoyarsk, 2016. Ch. 1. P. 89–91.
11. Romanov A. V., Testodov N. A. *Osnovy proektirovaniya informatsionno-upravlyayushchikh i mekhanicheskikh sistem kosmicheskikh apparatov* [Principles of design of instrumentation and control and mechanical systems of the spacecraft]. SPb., ANO LA “Professional”, 2015. P. 240.
12. Cha G. O., Skokov D. V., Skiba V. Yu. et al. [Vertical movement of the wheel point signage for weightlessness system]. *Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike*. 2015, No. 53, P. 188–194 (In Russ.).
13. Cha G. O., Skokov D. V., Gleim V. R. et al. [Design of drive signs point vertical movement for weightlessness system]. *Aktual’nye problemy v mashinostroenii*. 2016, No. 3, P. 229–233 (In Russ.).
14. Kovshov I. V., Badanina Yu. O. [Platform of automation of component weight compensation system for large spacecraft reflector]. *Vestnik SibGAU*. Vol. 17, No. 1, P. 131–136 (In Russ.).
15. Platform Mitsubishi Electric MELSEC System Q and its components. Available at: <http://mitsubishielectric.ru> (accessed: 01.04.2017).
16. Voronov A. A. *Osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniya. Avtomaticheskoe regulirovanie nepreryvnykh lineinykh sistem* [Foundations of the theory of automatic control. Automatic control of continuous linear systems]. Moscow, Energiya Publ., 1980, 309 p.
17. Dyadik V. F., Baidali S. A., Krinitsyn N. S. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: uchebnoe posobie* [Theory of automatic control: manual]. Tomsk, Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta Publ., 2011. 196 p.

Библиографические ссылки

1. Пат. SU 555314 СССР, G 09 В 9/00. Стенд для моделирования невесомости двухзвенных механизмов / Новожилов Д. А., Гребаус Э. Ф., Белоусова О. Г. ; Предприятие Г-4805. 25.04.1977.
2. Пат. RU 2299840 Российская Федерация, В 64 G 7/00. Устройство для обезвешивания секционных складных панелей солнечных батарей космического аппарата / Вохмин А. Г., Подзоров В. Н., Полевко И. Б. и др. ; ЗАО «КБ «Полет» 20.09.2005 г.
3. Пат. US 5110294A. Device for ground-based simulating of operations of a manipulator usable in space by means of a model of a space vehicle / Brand, Klingelhofer, Hoch (DE). 5.05.1992.
4. Пат. RU 2334970 Российская Федерация, G 01 М 19/00. Устройство имитации невесомости механизмов с гибкой конструкцией / Дроздов А. А., Агашкин С. В., Михнев М. М., Ушаков А. Р. ; ФГУП «Научно-производственное объединение прикладной механики им. академика М. Ф. Решетнева». 27.01.2008 г.
5. Пат. 139984 Российская Федерация, МПК⁷ G 09 В 9. Силокомпенсирующая система / Кравченко О. А. [и др.]. Заявл. 27.04.2014.
6. Пат. 2454694 Российская Федерация, МПК⁷ В 64 G 7/00, G 01 М 99/00. Способ имитации пониженной гравитации / Кудрявцев И. А. Заявл. 27.06.2012.
7. Пат. 1828261 RU A1 SU М 19/00. Устройство обезвешивания элементов / Ануприенко Г. Е., Карпачев Ю. А., Кухоцкий Л. М. [и др.]. 20.09.96.
8. Пат. US 5379657A. Microgravity suspension system for simulating a weightless environment / Hasselman, Quartararo (CA). 10.01.1995.
9. Автоматическая система обезвешивания крупногабаритных трансформируемых конструкций при раскрытии / А. Г. Верхогляд [и др.] // Известия вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 2. С. 134–142.
10. Автоматизированная система обезвешивания для наземной обработки солнечных батарей космических аппаратов / А. Г. Верхогляд [и др.] // Решетневские чтения : XX юбилейн. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генер. конструктора ракет.-космич. систем акад. М. Ф. Решетнева (09–12 нояб. 2016, г. Красноярск). В 2 ч. Ч. 1. Красноярск, 2016. С. 89–91.
11. Романов А. В., Тестоедов Н. А. Основы проектирования информационно-управляющих и механических систем космических аппаратов / под ред. д-ра техн. наук В. Д. Атамасова. СПб. : АНО ЛА «Профессионал», 2015. С. 240.
12. Привод вертикального перемещения точки вывески системы обезвешивания / Г. О. Ча [и др.] // Технические науки – от теории к практике. 2015. № 53. С. 188–194.
13. Проектирование привода вертикального перемещения точки вывески системы обезвешивания / Г. О. Ча [и др.] // Актуальные проблемы в машиностроении. 2016. № 3. С. 229–233.
14. Ковшов И. В., Баданина Ю. О. Платформа автоматизации компенсации весовой составляющей для крупногабаритных рефлекторов космических аппаратов // Вестник СибГАУ. Т. 17, № 1. С. 131–136.
15. Платформа Mitsubishi Electric MELSEC System Q и ее компоненты [Электронный ресурс]. URL: <http://mitsubishielectric.ru> (дата обращения: 01.04.2017).
16. Воронов А. А. Основы теории автоматического управления. Автоматическое регулирование непрерывных линейных систем. 2-е изд., перераб. М. : Энергия, 1980. 309 с.
17. Теория автоматического управления : учеб. пособие / В. Ф. Дядик, С. А. Байдали, Н. С. Криницын ; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2011. 196 с.

© Verhoglyad A. G., Kuklin V. A., Makarov S. N., Mihalkin V. M., Halimanovich V. I., 2017

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАБОЧЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ АКТИВНЫХ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

И. Н. Карцан^{1*}, С. В. Ефремова¹, Е. А. Шангина², А. И. Логачева³, Е. С. Горев⁴

¹Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

²АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

³Штаб материально-технического обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации
Российская Федерация, 119160, г. Москва, переулок Большой Копловский, 6

⁴Войсковая часть 40056

Российская Федерация, 125413, г. Москва, ул. Онежская, 26а

*E-mail: kartsan2003@mail.ru

Особенностью настоящего времени является переход к созданию многофункциональных комплексов наземных и бортовых радиотехнических систем на основе новых технических решений, повышающих уровень функциональной интеграции аппаратуры, в том числе путем внедрения в них активных фазированных антенных решеток (АФАР). В зависимости от решаемых задач такие антенные системы содержат от сотен до нескольких тысяч активных модулей (АМ). В связи с этим вероятность выхода из строя (отказов) АМ, по сравнению с пассивной фазированной антенной решеткой, повышается. Соответственно, встают вопросы обеспечения работоспособности АФАР в подобных условиях. Рассмотрено влияние рабочей температуры на характеристики излучения активной фазированной антенной решетки, размещаемой на космическом аппарате.

Ключевые слова: активная фазированная антенная решетка, отказы активных элементов, диаграмма направленности.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 3, P. 575–579

OPERATING TEMPERATURE AND ITS INFLUENCE ON THE RADIATION OF PHASED ANTENNA ARRAYS

I. N. Kartsan^{1*}, S. V. Efremova¹, E. A. Shangina², A. I. Logacheva³, Y. S. Gorev⁴

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

²JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

³Headquarters of material and technical support of the Armed Forces of the Russian Federation
6, Bolshoy Kozlovsky lane, Moscow, 119160, Russian Federation

⁴Military Unit Office 40056

26a, Oonezhskaya Str., Moscow, 125413, Russian Federation

*E-mail: kartsan2003@mail.ru

A current mainstream phenomenon is the design of ground based and onboard multifunctional radio electronics complexes, which are based on new technical solutions, including the application of active phased antenna arrays. This boosts the functional integration of the system equipment. Depending on the tasks, such antenna systems contain from hundreds to several thousand active modules. In this regard, the probability of failure of the active module drastically increases in comparison with the passive phased array. In these circumstances, ensuring the efficiency of active phased antenna array is a paramount task. In this paper we discuss the influence of operating temperature on the radiation characteristics in active phased antenna arrays onboard spacecraft.

Keywords: active phased antenna array, failures of active elements, radiation pattern.

Введение. Целесообразность построения того или иного вида передающего устройства во многом обуславливается его энергетическими характеристиками. Как правило, подобное устройство, особенно в системах с ограниченными источниками энергии, должно обеспечивать заданную излучаемую мощность при максимуме коэффициента полезного действия (КПД).

Активные фазированные антенные решетки (АФАР) описываются в основном теми же параметрами, что и антенны других типов. Они также обладают диаграммой направленности (ДН), уровнем боковых лепестков, коэффициентом направленного действия, коэффициентом усиления (КУ), излучаемой мощностью, диапазоном рабочих частот и другими величинами. Но, как правило, обычно используемый параметр – коэффициент усиления фактически непригоден для АФАР из-за наличия в схеме антенны активных элементов [1].

АФАР как передающее устройство не просто генерирует и излучает мощность в определенном направлении, но и максимально концентрирует ее в заданной части пространства, т. е. гарантирует максимум КУ [1].

В отличие от пассивных, активным фазированным антенным решеткам присущи дополнительные источники погрешностей сигналов возбуждения излучателей за счет присутствия в каждом канале решетки активных модулей (АМ), характеристики которых в каждый момент времени различны из-за воздействия дестабилизирующих факторов и непохожести их электрических параметров. Возникающие при этом искажения энергетического спектра ухудшают параметры радиоэлектронных комплексов и в первую очередь тех, где критериями качества генерируемых и излучаемых сигналов являются высокая степень монохроматичности колебаний и низкий уровень бокового излучения. Все рассмотренные выше обстоятельства определяют основные отличия расчета характеристик АФАР от иных типов антенн [1, 2].

Важным условием при создании современных спутниковых систем на базе АФАР является конечная стоимость продукции. Способом решения такой проблемы является применение интенсивно развивающейся теории численных методов, использование новых технологий проектирования и изготовления, а также устройств СВЧ, теплового обмена и несущей конструкции АФАР. При этом в классической постановке задача синтеза не дает ответа на вопрос о способе реализации АФАР. Это вызывает необходимость постановки новых, практически значимых задач параметрического и конструктивного синтеза, которые и определяют требуемые конечные характеристики АФАР. При этом АФАР представляет собой совокупность малых антенных систем с содержанием от нескольких десятков до нескольких сотен и даже тысяч активных модулей, которые с некоторой вероятностью могут выходить из строя [3]. В подобных условиях работы, тем более на орбите, когда нет возможности провести физическую замену отказавшего канала, необходимо четко представлять, к каким последствиям приведет отказ одного, двух и даже 20 % каналов усиления.

Сегодня режимы работы АФАР, размещаемых на космических аппаратах как ближнего, так и дальнего космоса, в значительной степени зависят от режимов работы систем обеспечения теплового режима (СОТР), так как известно, что работа таких сложных систем, как АФАР, связана с необходимостью отвода значительных плотностей потоков теплоты при воздействии внешних факторов космического пространства и собственных факторов работы устройств АФАР в режимах с высокими тепловыми нагрузками. Функционирование, надежность и управление комплектом электронных блоков (КЭБ) АФАР существенно зависит от СОТР, которые позволяют решить задачу температурной стабилизации и управления режимами КЭБ. Однако сбой в работе СОТР могут привести к отказам передающих (или приемно-передающих) АМ КЭБ. Знание характеристик направленности АФАР в таких сложных режимах работы с отказавшими АМ КЭБ позволит более эффективно управлять лучом при сканировании, заранее заложить компенсационные механизмы [3–5].

Электродинамический расчёт характеристик излучения АФАР дает возможность оценить изменение характеристик излучения АФАР при отказах каналов усиления, а также выявить влияние фазовых ошибок на характеристики излучения. Таким образом, в результате испытаний АФАР были получены экспериментальные данные, сравнение с которыми результатов расчётов позволяет дополнительно оценить адекватность полученных теоретических результатов.

Изменения характеристик АФАР, обусловленные отказами модулей, могут быть описаны статистическими методами. Средняя ДН по мощности системы из N излучателей имеет вид

$$\overline{|F(\vec{k}, \vec{k}_0)|^2} = \overline{|f(\vec{k})|^2} \left| \sum_{n=1}^N I_n (1 + A_n) e^{i(\vec{k} - \vec{k}_0, \vec{r}_n)} e^{i\Phi_n} \right|^2, \quad (1)$$

где $\vec{k}$ – волновой вектор, направленный в точку наблюдения; $\vec{k}_0$ – волновой вектор, направленный в точку фазирования системы; $\overline{|f(\vec{k})|^2}$ – средняя ДН излучателя по мощности; $\vec{r}_n$ – вектор, задающий положение n -го излучателя; I_n – детерминированная часть амплитуды возбуждения n -го излучателя; A_n , Φ_n – случайные амплитудная и фазовая ошибки возбуждения n -го излучателя. Соотношение позволяет с помощью усреднения по ансамблю реализаций случайных ДН АФАР найти зависимости ее параметров от параметров случайных амплитудно-фазовых ошибок [6–8].

Если амплитудные и фазовые ошибки в каналах независимы и малы, т. е. имеют нулевые средние значения и малую дисперсию $\alpha = (\overline{A_n^2} + \overline{\Phi_n^2}) < 1$, а средние значения амплитуд одинаковы ($I_n = 1$), то деградация параметров АФАР описывается приведенными ниже приближенными соотношениями.

Коэффициент усиления определяется соотношением

$$G = G_0 - \Delta G \approx G_0 e^{-\alpha} \approx G_0 (1 - \alpha). \quad (2)$$

Средняя погрешность установки максимума ДН $\delta\theta$, отнесенная к ширине ДН $\Delta\theta_{05}$ по уровню половинной мощности (для случая квадратной решетки) выражается формулой

$$\delta\theta / \Delta\theta_{05} \approx 0,3 \sqrt{\alpha / N}. \quad (3)$$

Распределение уровня боковых лепестков ДН подчиняется обобщенному релейскому закону. Средний уровень боковых лепестков ДН описывается соотношением

$$\overline{f_6^2} = f_{60}^2 + \alpha \pi / N, \quad (4)$$

где f_{60}^2 – относительное значение какого-либо бокового лепестка по мощности при отсутствии амплитудно-фазовых ошибок, $\overline{f_6^2}$ – среднее значение того же лепестка при наличии ошибок. В отдельной реализации уровень бокового лепестка может быть и больше. С вероятностью, практически равной единице, максимальный уровень бокового излучения не превосходит величины

$$f_1 = f_{60} + 3\sqrt{\alpha \pi / 2N}. \quad (5)$$

В 80 % реализаций уровень бокового лепестка не превышает величины

$$f_2 = f_{60} + \sqrt{\alpha \pi / 2N}. \quad (6)$$

Для оценки уровня первого бокового лепестка АФАР с квадратной апертурой при равноамплитудном возбуждении излучателей в формулах следует принять $f_{60} = 0,217$.

На рисунке приведены зависимости ΔG и f_1^2, f_2^2 для первого бокового лепестка от величины дисперсии α и числа излучателей N [9; 10].

Характерно, что деградация КУ зависит только от α , а боковое излучение, вызванное случайными ошибками, уменьшается с увеличением N . Так, максимальный уровень первого бокового лепестка решетки с прямоугольной апертурой, равный $-17,2$ дБ при отсутствии ошибок ($\alpha = 0$), повышается при наличии ошибки $\alpha = 0,3$ до $-8,8$ дБ в решетке с $N = 200$ и только до $-12,7$ дБ в решетке с $N = 20000$. Для тех же параметров относительная погрешность установки максимума ДН составляет примерно 1 % от ширины луча при $N = 200$ и только 0,1 % при $N = 20000$.

Соотношения (2)–(4) могут быть использованы и для оценки влияния выхода модулей из строя на характеристики АФАР [11].

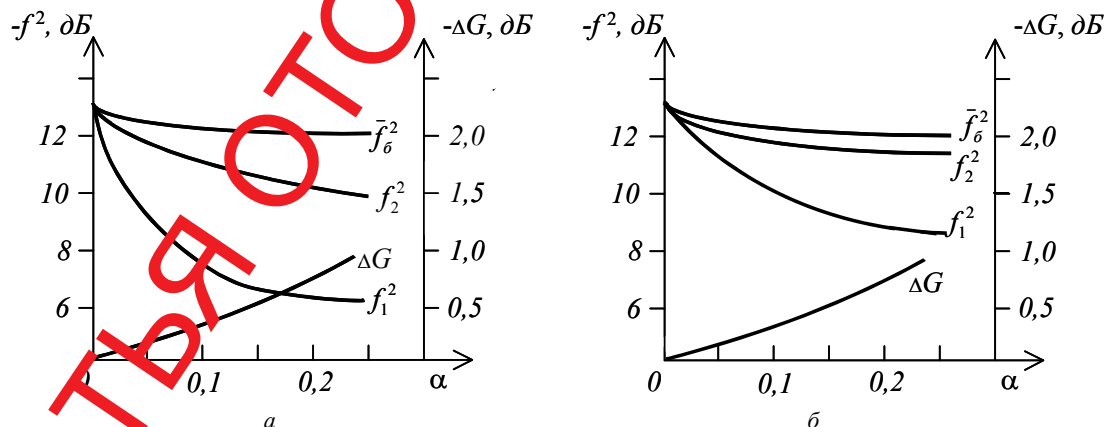
В статистической теории антенных решеток показано, что выход из строя n случайно расположенных элементов в решетке из N элементов можно считать эквивалентным действию равномерно распределенных по всем элементам решетки случайных амплитудно-фазовых ошибок с дисперсией $\alpha = n/N$ [12]. Выражая долю вышедших из строя элементов как функцию интенсивности отказов, получим:

$$\alpha = \alpha(t) = n(t) / N = 1 - e^{-\lambda t} \approx \lambda t = t / T_0. \quad (7)$$

Следует иметь в виду, что выход из строя модулей передающей АФАР приводит не только к ухудшению коэффициента усиления и диаграммы направленности, но и к снижению излучаемой мощности, поэтому потенциал передающей АФАР при $n \ll N$ описывается следующим соотношением:

$$\begin{aligned} P &= PG = P_0(1 - \alpha)e^{-\alpha} \approx \\ &\approx P_0(1 - \alpha)^2 = P_0(1 - t / T_0)^2. \end{aligned} \quad (8)$$

Наработка до отказа T_0 современных транзисторных передающих модулей АФАР X-диапазона достигает до 100 000 ч (более 11 лет). Приемные модули, выполненные по гибридной технологии, имеют наработку в 2–3 раза больше, а приемные модули на интегральных схемах СВЧ могут иметь $T_0 > 1\,000\,000$ ч, т. е. на порядок больше.



Зависимости характеристик АФАР от дисперсии амплитудно-фазовых ошибок α и числа излучателей: а – для $N = 50$; б – для $N = 200$

Dependence of the characteristics of active phased antenna arrays on the dispersion of the amplitude-phase errors α and the number of radiators: а – for $N = 50$; б – for $N = 200$

Из соотношений (7), (8) следует, что передающая АФАР, имеющая $N = 20\,000$ модулей с $T_0 = 100\,000$ ч, за один год работы без ремонта (около 8600 ч) претерпит следующие изменения параметров: снижение КУ и эффективной площади апертуры – примерно 0,4 дБ, уменьшение потенциала – примерно 0,8 дБ, максимальный рост первого бокового лепестка – не более 0,3 дБ, максимальная погрешность установки луча – примерно 0,2 % (здесь не учтена погрешность установки, связанная с дискретностью фазовращателей и погрешностями калибровки каналов решетки) [14].

Приведенные параметры достижимы при условии, что правильно выбран тепловой режим работы мощных транзисторов. Это обеспечивается за счет организации оптимального режима их работы на пониженном уровне мощности, рационального выбора материалов корпуса и его конструкции, обеспечивающей максимальный отвод тепла от кристаллов, достаточного расхода охлаждающего воздуха или жидкости в системе охлаждения.

Практически, модули, находящиеся у краев апертуры, за счет теплопередачи в окружающую среду имеют более низкую температуру, чем модули, расположенные в центральной части. Например, в литературе приведены результаты испытаний 17-элементной активной решетки с воздушным охлаждением [13–15]. Потребляемая от источника мощность постоянного тока в каждом канале составляет 9 Вт. В отсутствие принудительного охлаждения центральные элементы решетки имеют температуру примерно 100 °С, крайние – 60 °С. При включенном принудительном обдуве эти температуры составляют 40 и 20 °С соответственно.

Заключение. Таким образом, повышенная температура в центральной части апертуры приводит к более высокой интенсивности отказов. Это, в свою очередь, приводит к более высокому росту бокового излучения.

Для более точного описания характеристик АФАР необходимо создание модели ее надежности. Такая модель должна учитывать энергетические параметры модулей и их элементов, зависимость КПД (и, следовательно, рабочей температуры) от уровня выходной мощности, зависимость температур от конструктивных параметров системы охлаждения, упомянутую выше зависимость наработки на отказ от температуры, более точное описание интенсивности отказов модулей на основе анализа интенсивности отказов их элементов.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 14.577.21.0220, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57716X0220).

Acknowledgments. This work was supported by a project of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (agreement No. 14.577.21.0220, unique project identifier RFMEFI57716X0220).

Библиографические ссылки

1. Активные фазированные антенные решетки / под ред. Д. И. Воскресенского и А. П. Канащенкова. М. : Радиотехника, 2004. 488 с.

2. Воскресенский Д. И. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток. М. : Радиотехника, 2003. 632 с.

3. Сабиров Т. Р. Характеристики излучения передающей АФАР при отказах каналов усиления // Радиолокация и радиосвязь : доклады 6-й Всерос. науч.-техн. конф. (19–22 ноября 2012, г. Москва). М. : Издание JRE – ИПЭ им. В. А. Котельникова РАН, 2012. Т. 2. С. 133–135.

4. Дмитриев Д. Д., Тяпкин В. Н., Кремер Н. С. Методы адаптации фазированных антенных решеток к помехам в спутниковых радионавигационных системах // Радиотехника. 2013. № 9. С. 39–43.

5. Пространственное подавление помех при различных конфигурациях антенно-решетки угломерной навигационной аппаратуры / В. Н. Тяпкин [и др.] // Научные технологии. 2016. Т. 17, № 8. С. 52–56.

6. Phase methods for measuring the spatial orientation of objects using satellite navigation equipment / Yu. L. Fateev [et al.] // IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering. 2015. № 94 (1). DOI: 10.1088/1757-899X/94/1/012022.

7. Нарботка на отказ адаптивной цифровой антенной решетки / И. Н. Карцан [и др.] // Norwegian Journal of development of the International Science. 2017. Т. 2, № 9. С. 61–64.

8. Гостюхин А. В., Трусков В. Н. Коррекция характеристик направленности АФАР при отказах АМ // Антенны. 2003. Вып. 3–4 (70–71). С. 15–23.

9. Algorithms for adaptive processing of signals in a phased antenna array / V. N. Tyapkin [et al.] // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON – 2017 (29–30 June 2017, Astana, Kazakhstan). 2017. DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998452.

10. Spatial filtering algorithms in adaptive multi-beam hybrid reflector antennas / V. N. Tyapkin [et al.] // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON – 2015. (21–23 May 2015, Omsk). 2015. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147244.

11. Spatial suppression of interference in hybrid reflector antennas / I. N. Kartsan [et al.] // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016, № 122.. DOI: 10.1088/1757-899X/122/1/012010.

12. Шифрин Я. С. Вопросы статистической теории антенн. М. : Советское радио, 1970. 384 с.

13. Серенков В. И., Карцан И. Н., Дмитриев Д. Д. Метод синтеза амплитудно-фазового распределения гибридно-зеркальной антенны // Вестник СибГАУ. 2015. Т. 16, № 3. С. 664–669.

14. Correcting non-identity in receiving channels in interference-immune systems for GLONASS and GPS / V. N. Tyapkin [et al.] // International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON – 2015 (21–23 May 2015, Omsk). 2015. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147246.

15. Зависимость характеристик активной фазированной антенной решетки от наработки / И. Н. Карцан [и др.] // Научный альманах. 2017. № 7–1(33). С. 189–192.

References

1. Voskresenskii D. I., Kanaschenkov A. P. et al. *Aktivnye fazirovannye antennnye reshetki* [Active phased antenna arrays]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2004, 488 p.

2. Voskresenskii D. I. *Ustroistvo SVCh i anteny. Proektirovanie fazirovannykh antennoykh reshetok* [Microwaves and antennas. The design of phased antenna arrays] Moscow, Radiotekhnika Publ., 2003, 632 p.
3. Sabirov T. R. [The characteristics of radiation of a transmitting active phased antenna array]. *Doklady 6-y Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Radiolokatsiya i radiosvyaz"* [Proceedings of the 6th All-Russian scientific research conference "Radiolokatsiya i radiosvyaz"]. Moscow, 19–22 November 2012. Moscow, 2012. Vol. 2, P. 133–135 (In Russ.).
4. Dmitriev D. D., Tyapkin V. N., Kremez N. S. [Methods of adaptation of the phased antenna array to noise in satellite radio navigational systems]. *Radio-tekhnika*. 2013, No. 9, P. 39–43 (In Russ.).
5. Tyapkin V. N., Garin, E. N., Ratushniak V. N., Gladyshev A. D. [The spatial noise suppression in various configurations goniometric of navigation equipment]. *Naukoenkie tekhnologii*. 2016, Vol. 17, No. 8, P. 52–56 (In Russ.).
6. Fateev Yu. L., Dmitriev D. D., Tyapkin V. N., Kartsan I. N., Goncharov A. E. Phase methods for measuring the spatial orientation of objects using satellite navigation equipment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, Vol. 94 (1). DOI: 10.1088/1757-899X/94/1/012022.
7. Kartsan I., Kiselev G., Kiseleva Ye., Logacheva A., Nasyrov I., Efremova S. Handling to failures in smart antennas. *Norwegian Journal of development of the International Science*. 2017, Vol. 2, No. 9, P. 61–64 (In Russ.).
8. Gostiukhin A. V., Trusov V. N. [The correction of active phased antenna arrays directivity during failure of active modules]. *Antenny*. 2003, Vol. 3–4 (70–71), P. 15–23 (In Russ.).
9. Tyapkin V. N., Kartsan I. N., Dmitriev D. D., Efremova S. V. Algorithms for adaptive processing of signals in a flat phased antenna array. *2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. 2017. (Astana, Kazakhstan, 29–30 June 2017). 2017. DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998452.
10. Tyapkin V. N., Kartsan I. N., Dmitriev D. D., Goncharov A. E. Spatial Filtering Algorithms in Adaptive Multi-Beam Hybrid Reflector Antennas. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. 2015. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147244.
11. Kartsan I. N., Zelenkov P. V., Tyapkin V. N., Dmitriev D. D., Goncharov A. E. Spatial suppression of interference in hybrid reflector antennas. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2016, Vol. 122, P. 012010. DOI: 10.1088/1757-899X/122/1/012010.
12. Shifrin Ia. S. *Voprosy statisticheskoi teorii anten* [Issues of the statistical antenna theory]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1970, 384 p.
13. Serenkov V. I., Kartsan I. N., Dmitriev D. D. [Method for the synthesis of amplitude-phase distribution of hybrid-mirror download]. *Vestnik SibGAU*. 2015, Vol. 16, No. 3, P. 661–669 (In Russ.).
14. Tyapkin V. N., Kartsan I. N., Dmitriev D. D., Goncharov A. E. Correcting non-identity in receiving channels in interference-immune systems for Glonass and GPS. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. 2015. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147246.
15. Kartsan I. N., Kiseleva E. A., Logacheva A. I., Kartsan T. I. [Dependence of the characteristics of the active phased array antenna on the time]. *Science Almanac*. No. 7–1(33), P. 189–192. DOI: 10.17117/na.2017.07.01.189 (In Russ.).

© Карцан И. Н., Ефремова С. В., Шангина Е. А.,
Логачева А. И., Горев Е. С., 2017

СТУДЕНЧЕСКАЯ ПИКОСПУТНИКОВАЯ ПЛАТФОРМА SIBQUBE: РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА КОРПУСА ПИКОСПУТНИКА КЛАССА POCKETQUB

А. П. Кравчуновский*, М. Н. Драганюк, Д. М. Зуев, С. А. Скоробогатов, П. В. Мовчан

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: anton.kravchunovsky@yandex.ru

Приведена концепция и некоторые результаты разработки студенческого космического аппарата (КА) стандарта PocketQub, а именно, разработан прототип корпуса студенческого пикоспутника SibQube. Представлены некоторые из существующих на данный момент стандартов сверхмалых КА (СМКА), их основные различия, заключающиеся прежде всего в массогабаритных характеристиках самого аппарата и выполняемых им задачах. Приведены цели создания платформы: использование в области образования, проведение научных экспериментов в космическом пространстве. Приведены основные ведущие факторы разработки и планируемый состав служебной платформы разрабатываемого СМКА. После проведения испытаний корпуса и дальнейшей его доработки становится возможным использование его в качестве основы для линейки корпусов СМКА, предназначенных для исследования малоизученных верхних слоев атмосферы и ближнего космоса. Спроектирован и изготовлен прототип корпуса КА. Описана конструкция корпуса разрабатываемого КА стандарта PocketQub и предназначение элементов конструкции и их функциональные особенности. Выбраны материалы для изготовления прототипа, и приведены основания их выбора. Также был проведен прочностной анализ конструкции корпуса, а именно: модальный анализ, направленный на поиск собственных частот конструкции, статический анализ на воздействие линейных перегрузок до 20 g, соответствующих линейным перегрузкам, возникающим при полете ракеты-носителя «Днепр», и динамический анализ случайных воздействий. На основании результатов анализа сделаны предварительные выводы о прочности и устойчивости конструкции при воздействии рассмотренных факторов.

Ключевые слова: космический аппарат, PocketQub, корпус, пикоспутник.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 3, P. 580–584

STUDENT PICOSATELLITE PLATFORM SIBQUBE: DEVELOPMENT OF PROTOTYPE STRUCTURE OF POCKETQUB CLASS PICOSATELLITE

A. P. Kravchunovsky*, M. N. Draganyuk, D. M. Zuev, S. A. Skorobogatov, P. V. Movchan

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: anton.kravchunovsky@yandex.ru

The article includes the conception and several results of the development of the PocketQub student spacecraft, namely the prototype of the student satellite SibQube is designed. In the article there are some midget spacecrafts standards known for today, their main distinctions which are consisted in dimensions of the satellite and its tasks. The article defines the goals of the creation of the platform: its usage in the educational sphere and running experiments in the space area. This article presents the most major factors of developing and projected constitution of the service platform of the midget spacecraft. After testing the spacecraft body and its further modifications, it is possible to use it as the base for the range of midget spacecraft bodies intended for the researching of atmosphere top layers and near-the-earth space. We designed and produced the prototype of the spacecraft body. The article describes the body construction of developing PocketQub spacecraft and usage of the structure elements of the construction and their functioning particularities in it. We defined the materials for the model producing. Besides, the article describes reasons for their choice. In addition, we have made a strength analysis of satellite structure, namely mode identification analysis to find normal frequencies, static analysis of the effects of linear accelerations within limits of 20 g, appeared during the flight of the Dnepr launch vehicle, and dynamical analysis of random influences. Based on the results of the analysis preliminary conclusions were made about the construction strength and stability when the determinants discussed above influence.

Keywords: spacecraft, PocketQub, structure, picosatellite.

Введение. В последние 10–20 лет в космической отрасли ярко выражена тенденция миниатюризации космических платформ.

Наиболее распространенным результатом миниатюризации является стандарт КА CubeSat. Стандарт регламентирует габариты КА на уровне $10 \times 10 \times 10$ см, 1,3 кг (базовая единица 1U), форму корпуса и набор интерфейсов [1]. Данные КА запускаются с помощью пусковых контейнеров, размещенных в качестве попутной нагрузки на ракетах-носителях, тяжелых КА и международной космической станции. КА CubeSat изначально были задуманы для образовательных целей, но также приобрели популярность в качестве научного, коммерческого и популяризационного инструмента.

Также были разработаны более миниатюрные стандарты КА: PocketQub ($5 \times 5 \times 5$ см, 125 г) [2], FemtoSAT ($3 \times 3 \times 3$ см, 35 г) [3] (рис. 1), а также спрайты (Sprites), чипсаты (ChipSat) [4], которые состоят из небольшой печатной платы, на которой присутствуют солнечные батареи, передатчик, процессор и некоторый набор простых датчиков. Обычно такие КА просто транслируют записанные сообщения.

Стандарт PocketQub. Данный стандарт регламентирует внешние габариты КА $5 \times 5 \times 5$ см и массу 125 г, что соответствует формату 1р. Стандарт предусматривает различные компоновки от 1р до 8р. Существует возможность запуска КА данного класса с использованием уже существующих контейнеров для КА класса CubeSat. Кроме массогабаритного стандарта существует также стандарт PQ60 [7], который регламентирует размеры печатных плат, типы межплатных электроинформационных разъемов и их распиновку.

Изначально стандарт разрабатывался в рамках концепции 50\$Sat – низкобюджетных спутников для широкого доступа в космос. Стандарт был разработан профессором Бобом Твиггсом совместно с Государственным университетом Морхеда [8].

На данный момент запущено четыре космических аппарата подобного класса: \$50Sat [9], Wren [10], Qubescout S1 [11], T-LogoQube [12]. Данные КА были запущены в составе миссии UniSat-5 с использованием ракеты-носителя «Днепр» в ноябре 2013 г.

Разрабатываемый сверхмалый космический аппарат SibQube. В Сибирском государственном университете науки и технологий разрабатывается студенческая спутниковая платформа SibQube, отно-

сящаяся к классу пикоспутников (рис. 2). Внешний вид КА представлен на рис. 2, а.

Целью разработки является создание платформы-конструктора с низкой стоимостью для образовательных и научных целей. Основными потребителями будут являться научные организации, университеты, школы и организации дополнительного образования.

Платформа может быть применима для следующих задач:

- образовательные программы для студентов и школьников;
- выполнение технологических экспериментов;
- построение группировок КА для изучения параметров верхней атмосферы.

На данный момент стоит задача разработки служебной платформы. В базовом составе платформа должна включать в себя следующие системы: конструкции корпуса; механизм зачекочки антенн; бортовой комплекс управления; система электропитания; система приема и передачи данных (полнодуплексная); набор сенсоров.

В связи с малыми габаритами КА существует проблема энергообеспечения, связанная с малой площадью солнечных батарей. Таким образом, одним из важных факторов разработки является обеспечение высокого уровня энергосбережения. Другим важным фактором разработки является обеспечение итоговой низкой стоимости платформы, чтобы сделать ее доступной широкому кругу потребителей [13].

Конструкции корпуса. Корпус представляет собой сборную алюминиевую конструкцию (с возможностью масштабирования до размеров 2р, 3р без принципиальных изменений в конструкции). Конструкционная целостность достигается за счет винтового соединения. В качестве материала был выбран сплав Д16, так как он имеет подходящие механические свойства. В конструкции корпуса используются гнутые детали из листового металла из-за низкой стоимости производства и особенностей сборки (рис. 2, б) [14]. Основой корпуса служит стандартизированная алюминиевая пластина Base plate. Она удерживает КА в пусковом контейнере, а также обеспечивает возможность перемещения КА по направляющим в контейнере при выведении аппарата из контейнера. Микропереключатели обеспечивают переход КА из спящего в активный режим при выходе аппарата из контейнера.

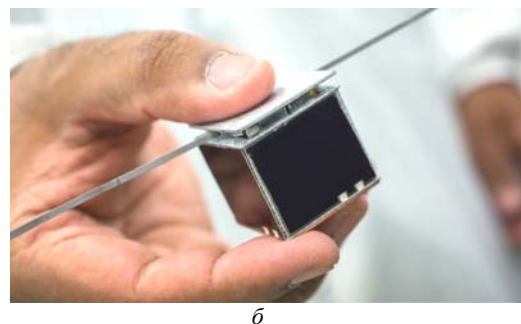
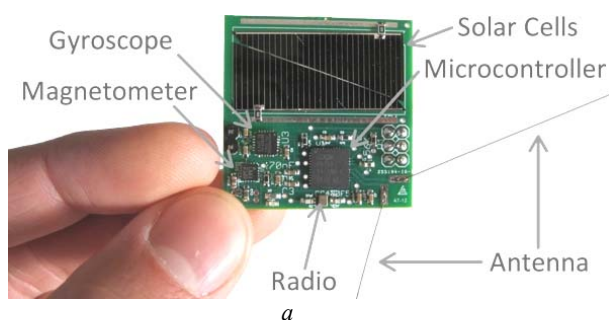


Рис. 1. Устройство космического аппарата: а – класса KickSat [5]; б – стандарта FemtoSAT [6]

Fig. 1. Structure of spacecraft: а – KickSat class [5]; б – FemtoSAT standard [6]

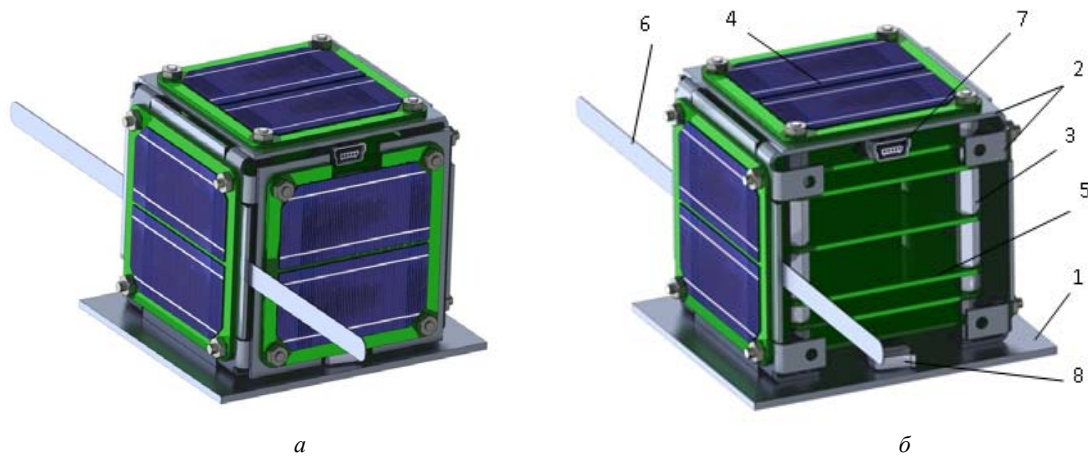


Рис. 2. Космический аппарат стандарта PocketQub: *а* – внешний вид; *б* – устройство: 1 – Base plate; 2 – стенки корпуса; 3 – межплатные стойки; 4 – фотоэлемент; 5 – плата радиоэлектронного модуля; 6 – антенна; 7 – сервисный разъем; 8 – микропереключатель

Fig. 2. PocketQub standard spacecraft: *a* – exterior view; *b* – structure: 1 – Base plate; 2 – sides of a body; 3 – interplane legs; 4 – photocell; 5 – board of electronic module; 6 – antenna; 7 – service connector; 8 – microswitch

Электронно-технический модуль принципиально представляет собой совокупность печатных плат, разделенных межплатными стойками. Печатные платы связаны между собой электроинформационными межплатными соединениями. Таким образом, платы внутри КА организованы в структуру типа «стэк». КА предполагается оборудовать набором внешних сервисных информационных и электрических интерфейсов для обеспечения возможности внесения поправок в структуру программного обеспечения аппарата, зарядки аккумуляторных батарей.

Изготовленный прототип корпуса представлен на рис. 3. Описанная конструкция полученного прототипа имеет массу 97 г. На данном этапе был изготовлен технологический прототип, задачей которого было подтвердить конструкционные решения, задача максимального облегчения корпуса аппарата не ставилась. Выполнение в стенках вырезов позволит снизить массу деталей корпуса до 20 %.

Анализ конструкции. Расчет для проверки прочности и устойчивости конструкции проводился в конечно-элементном пакете Ansys с использованием модулей Ansys Workbench, Ansys Design Modeller и Ansys Mechanical.

Каждой детали был присвоен материал с уникальными физико-механическими свойствами. Материал платы – текстолит. Материал шпилек – латунь. Материал батарей – кремний.

Граничные условия для анализа соответствуют данным по выведению на орбиту ракеты-носителя (РН) «Днепр» [15].

Был проведен статический анализ на воздействие линейных перегрузок до 20 g; модальный анализ на собственные частоты, динамический анализ случайных воздействий. Анализ на воздействие линейных перегрузок по всем трем осям до 20 g проводился в трех вариантах:

- 1) продольное направление ускорения;
- 2) поперечное направление ускорения;
- 3) направление ускорения под углом в 45° ко всем трем плоскостям.

Граничными условиями для каждого варианта анализа являются ускорение перегрузки и ускорение свободного падения.

Фиксированная геометрия применяется для фиксации модели от свободного перемещения по всем трем осям. Фиксация применяется на крайней грани Base plate (спутник упирается ей в направляющие контейнера).

На основе проведенных расчетов установлено, что при заданных условиях линейных перегрузок конструкция выдерживает нагрузки. Максимальное напряжение, наблюдаемое в модели, не превышает 3,1 МПа. В местах наибольшей концентрации напряжений максимальные напряжения для всех элементов конструкции значительно меньше предела текучести. Это способствует высокому коэффициенту запаса прочности.

Перед проведением анализа на случайную вибрацию необходимо провести модальный анализ на поиск собственных частот. Поиск собственных частот осуществлялся в диапазоне от 0 до 2000 Гц.

Деформации при собственных частотах возникают исключительно в печатных платах электронно-технического модуля.

Результаты модального анализа представлены в табл. 1. На основе модального анализа был проведен анализ на случайные воздействия. В расчет была введена спектральная плотность виброускорений в зависимости от частоты, эквивалентная вибрационным нагрузкам при полете РН «Днепр».

Было рассмотрено два расчетных случая:

- 1) нагружение по продольной оси;
- 2) нагружение по поперечной оси.

Результаты представлены в табл. 2.

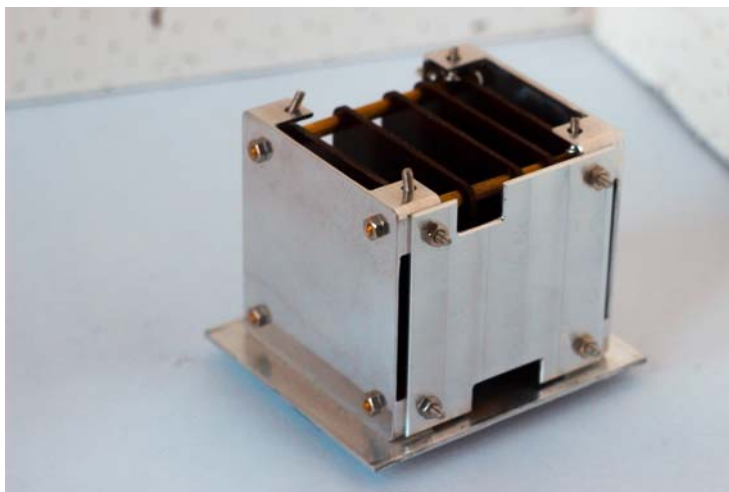


Рис. 3. Фотография полученного прототипа корпуса

Fig. 3. Photo of the structure of the prototype produced

Таблица 1

Моды собственных частот КА

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Частота, Гц	865,8	867,2	874,1	879,3	880,9	1435,3	1436,6	1438,3	1441,4
№	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Частота, Гц	1445,2	1454,8	1456,2	1456,5	1459,1	1467,8	1485,2	1488,1	1552,5

Таблица 2

Результаты динамического анализа случайных воздействий

Масштаб	1 σ	2 σ	3 σ
Вероятность возникновения, %	68,269	95,45	99,73
Эквивалентное напряжение, МПа	2,637	5,275	7,912

Так как случайная вибрация является величиной неявно заданной, можно лишь определить вероятность возникновения определенной нагрузки в диапазоне частот от 0 до 2000 Гц. Используется статистический анализ, определяющий вероятность появления той или иной амплитуды искомого параметра. Результаты исследований распределяются по нормальному закону.

По результатам проведенных анализов установлено, что конструкция не имеет собственных частот в низкочастотном диапазоне (резонанс возможен при частотах выше 850 Гц). Первая собственная частота наблюдаются при 870 Гц, вторая – при 1450 Гц. Это удовлетворяет заявленным требованиям, что собственные частоты конструкции не должны быть меньше 10–20 Гц. Наиболее высокие показатели спектральной плотности мощности напряжения наблюдаются на второй собственной частоте (1465 Гц), т. е. при данной частоте возникают самые высокие нагрузки.

Однако максимальное возможное напряжение не превышает 8 МПа, что значительно меньше пределов текучести материалов (в среднем около 100–200 МПа для алюминиевых сплавов). Это способствует высокому коэффициенту запаса прочности. Разработанная конструкция удовлетворяет заявленным требованиям.

Заключение. В статье были рассмотрены некоторые стандарты пико- и наноспутников. Приведена

концепция и результаты текущей итерации разработки корпуса пикоспутника SibQube, разрабатываемого в СибГУ им. М. Ф. Решетнева.

Разработанный и изготовленный прототип корпуса СМКА стандарта RocketQub позволяет отработать технологию производства и сборки такого типа корпуса. В ходе сборки модели выявлено, что конструкция отдельных узлов не удовлетворяет поставленным эргономическим требованиям простоты конструкции и легкости сборки. Таким образом, конструкция требует доработок, направленных на общее облегчение процесса сборки и наземного обслуживания аппарата, а также достижение минимальной массы при сохранении прочностных характеристик.

В результате проведенного расчета конструкции было выявлено, что конструкция удовлетворяет заявленным требованиям на прочность и устойчивость.

Благодарности. Выражаем благодарность Аэрокосмическому колледжу СибГАУ и ресурсному центру коллективного пользования «Космические аппараты и системы» за помощь в изготовлении деталей прототипа.

Acknowledgments. We express our gratitude to the Aerospace College of SibSAU and the Resource center for collective use “Space vehicles and systems” for their assistance in the manufacture of prototype parts.

Библиографические ссылки

References

1. CubeSat Design Specification: стандарт по CubeSat, версия 13 от 20.02.2014 г. [Электронный ресурс]. URL: https://2.cubesat.org/images/developers/cds_rev13_final2.pdf (дата обращения: 18.11.2016).
2. The PocketQub Standard [Электронный ресурс]. URL: <http://pocketqub.org/standard/> (дата обращения: 15.10.2015).
3. SunCube FemtoSat Standard [Электронный ресурс]. URL: <http://suncube.asu.edu/> (дата обращения: 21.11.2016).
4. A Survey of Current Femtosatellite Designs, Technologies, and Mission Concepts [Электронный ресурс]. URL: <http://www.jossonline.com/wp-content/uploads/2016/10/Perez-Final-A-Survey-of-Current-Femtosatellite-Designs-Technologies-and-Mission-Concepts1.pdf> (дата обращения: 21.11.2016).
5. Mass Launch of 437 MHz Satellites [Электронный ресурс]. URL: <https://amsat-uk.org/2014/03/03/mass-launch-of-437-mhz-satellites/> (дата обращения: 25.11.2016).
6. ASU: Arizona State University [Электронный ресурс]. URL: <https://asunow.asu.edu/20160406-creativity-asu-suncube-femtosat-space-exploration-for-everyone> (дата обращения: 25.11.2016).
7. PQ60 standart. An electrical standard for PocketQubes [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pq60.info/> (дата обращения: 20.11.2016).
8. Making it small [Электронный ресурс]. URL: http://mstl.atl.calpoly.edu/~bklofas/Presentations/DevelopersWorkshop2009/1_Twiggs-PocketQub.pdf (дата обращения: 20.11.2016).
9. \$50SAT – Eagle2 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.50dollarsat.info/> (дата обращения: 20.11.2016).
10. Gunter's Space Page, Wren [Электронный ресурс]. URL: http://space.skyrocket.de/doc_sdat/wren.htm (дата обращения: 20.11.2016).
11. Gunter's Space Page, QubeScout S1 [Электронный ресурс]. URL: http://space.skyrocket.de/doc_sdat/qubescout-s1.htm (дата обращения: 20.11.2016).
12. T-LogoQube [Электронный ресурс] URL: <https://universe.sonoma.edu/T-LogoQube/?q=public> (дата обращения: 20.11.2016).
13. Концепция студенческой пикоспутниковой платформы SibQube / Д. М. Зуев [и др.] // Решетневские чтения : материалы XX юбилейной Междунар. науч. конф. (09–12 нояб. 2016, г. Красноярск). В 2 ч. Ч. 1. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. С. 622–623.
14. Марковцев В. А., Филимонов В. И. Ресурсосберегающие технологии и оборудование для производства профилей и гофрированных панелей // Формообразование гнутых профилей: теория и практика : сб. науч. тр. / под науч. ред. д-ра техн. наук, профессора В. И. Филимонова. Ульяновск : УлГТУ, 2011. С. 146–153.
15. Dnepr User's Guide [Электронный ресурс]. URL: http://www.kosmotras.en/docs_mkk/ (дата обращения: 14.8.2016).
1. *Standard po CubeSAT "CubeSat Design Specification"* [CubeSat standard "CubeSat Design Specification"]. California, USA, ver. 13, 20.02.2014. Available at: http://2.cubesat.org/images/developers/cds_rev13_final2.pdf (accessed: 18.11.2016).
2. The PocketQub Standard. Available at: <http://pocketqub.org/standard/> (accessed: 15.10.2015).
3. SunCube FemtoSat Standard. Available at: <http://suncube.asu.edu/> (accessed: 21.11.2016).
4. A Survey of Current Femtosatellite Designs, Technologies, and Mission Concepts. Available at: <http://www.jossonline.com/wp-content/uploads/2016/10/Perez-Final-A-Survey-of-Current-Femtosatellite-Designs-Technologies-and-Mission-Concepts1.pdf> (accessed: 21.11.2016).
5. Mass Launch of 437 MHz Satellites. Available at: <https://amsat-uk.org/2014/03/03/mass-launch-of-437-mhz-satellites/> (accessed: 25.11.2016).
6. ASU: Arizona State University. Available at: <https://asunow.asu.edu/20160406-creativity-asu-suncube-femtosat-space-exploration-for-everyone> (accessed: 25.11.2016).
7. PQ60 standart. An electrical standard for PocketQubes. Available at: <http://www.pq60.info/> (accessed: 20.11.2016).
8. Making it small. Available at: http://mstl.atl.calpoly.edu/~bklofas/Presentations/DevelopersWorkshop2009/1_Twiggs-PocketQub.pdf (accessed: 20.11.2016).
9. \$50SAT – Eagle2. Available at: <http://www.50dollarsat.info/> (accessed: 20.11.2016).
10. Gunter's Space Page, Wren. Available at: http://space.skyrocket.de/doc_sdat/wren.htm (accessed: 20.11.2016).
11. Gunter's Space Page, QubeScout S1. Available at: http://space.skyrocket.de/doc_sdat/qubescout-s1.htm (accessed: 20.11.2016).
12. T-LogoQube. Available at: <https://universe.sonoma.edu/T-LogoQube/?q=public> (accessed: 20.11.2016).
13. Zuev D. M., Kravchunovsky A. P., Lapaev K. A., Skorobogatov S. A., Kostyukov A. S. [Concept of "SibQube" student satellite bus]. *Materialy XX Yubileynoy mezhduar. nauch.konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XX Anniversary Intern. Scientific. Conf. "Reshetnev readings"]. Krasnoyarsk, 2016, P. 622–623 (In Russ.).
14. Markovtsev V. A., Filimonov V. I. [Efficient technologies and equipment for profiles and corrugated plates]. *Formoobrazovanie gnutykh profiley: teoriya i praktika* [Shaping of bent profiles: theory and practice]. Ul'yanovsk, UIGTU Publ., 2011, P. 146–153.
15. Dnepr User's Guide. Available at: http://www.kosmotras.en/docs_mkk/ (accessed: 14.8.2016).

© Кравчуновский А. П., Драганюк М. Н., Зуев Д. М.,
Скоробогатов С. А., Мовчан П. В., 2017

**ПОДСИСТЕМА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ
ДЛЯ БИОЛОГО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ
КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**Е. А. Морозов^{1,2*}, С. В. Трифонов^{1,2}, М. Ю. Салтыков¹, А. В. Мурыгин², А. А. Тихомиров^{1,2}¹Институт биофизики СО РАН

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/50

²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: transserfer89@gmail.com

На кафедре замкнутых экологических систем Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева совместно с Институтом биофизики Сибирского отделения Российской академии наук ведутся разработки искусственного высокопроизводительного физико-химического звена редуцентов для биолого-технических систем жизнеобеспечения космического назначения, в частности, для готовящегося эксперимента БИОС-4 с экипажем из 3 человек. Физико-химическая переработка отходов требуется из-за неприемлемости для вывода на орбиту очень больших буферных емкостей, а значит, и масс – многих естественных составляющих биологических звеньев переработки отходов. Подсистема физико-химических реакторов для переработки органических отходов в удобрения для выращивания культурных растений на гидропонике периодически совершенствуется. Параллельно разрабатываются различные варианты подобных функциональных звеньев с различными характеристиками. Рассматривается подсистема физико-химических реакторов переработки отходов в биолого-технической системе жизнеобеспечения БИОС-4. Целью статьи является обзор текущего состояния особенностей разработки технологий переработки отходов с использованием подсистемы физико-химических реакторов на основе метода «мокрого сжигания», а также ее автоматизации и компьютерного мониторинга параметров протекания процесса. Рассматриваемая установка для переработки органических отходов в удобрения применительно к замкнутым экосистемам космического назначения состоит из подсистемы реакторов «мокрого сжигания», разложения мочевины и синтеза H_2O_2 . Авторы разрабатывают единый интерфейс сбора данных о параметрах работы вышеуказанных реакторов и систему автоматического управления ими. Представлены технические детали протекающих, разрабатываемых и проектируемых процессов переработки отходов. Дано целостное представление о звене физико-химической переработки отходов на экспериментальном стенде БИОС-4 сегодня. К настоящему моменту представлены действующие установки либо концептуальные решения для их разработки, включая автоматизацию. Для всех основных звеньев технологической подсистемы переработки отходов применительно к биолого-техническим системам жизнеобеспечения космического назначения ведется их оптимизация и экспериментальная проверка.

Ключевые слова: пилотируемые космические полеты, замкнутые системы жизнеобеспечения, круговорот, технологические процессы, переработка отходов, удобрения, автоматизация.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 3, P. 585–591

**SUBSYSTEM OF PHYSICO-CHEMICAL REACTORS OF MINERALIZING WASTES
FOR SPACE APPLICATION BIO TECHNICAL LIFE SUPPORT SYSTEMS**Ye. A. Morozov^{1,2*}, S. V. Trifonov^{1,2}, M. Yu. Saltykov¹, A. V. Murygin², A. A. Tikhomirov^{1,2}¹Institute of Biophysics SB RAS

50/50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: transserfer89@gmail.com

The Department of Closed Ecological Systems of Reshetnev Siberian State University of Science and Technology together with the Institute of Biophysics SB RAS are developing the artificial high-performance physicochemical link of the decomposers for bio technical life support systems for space applications, in particular for the forthcoming experiment BIOS-4 with a crew of 3 people. The physicochemical processing of waste is required because of the very large buffer capacities thus masses for orbital launching of many natural components comprising the biological waste

treatment links. A subsystem of physicochemical reactors for the processing of wastes into fertilizers for cultivating edible plants on hydroponics is being periodically improved. Different versions of the similar functional links with different characteristics are being developed in parallel. The subject of the article is the subsystem of physical-chemical reactors of organic waste processing in the bio technical life support system BIOS-4. The aim is to present the review of peculiarities of the development of the organic wastes treatment physical-chemical reactors subsystem based on "wet combustion" method, as well as its automation and computer monitoring of the process flow parameters. The considered technological subsystem of organic wastes treatment into fertilizers applied to space application closed ecosystems comprises the reactors of "wet combustion", urea decomposition, and H_2O_2 synthesis. The authors develop a united interface of collecting data of the reactors operation parameters, and the reactor's automation control system. Technical details of the ongoing, developed and projected processes are presented. A holistic view has been given of the physical-chemical reactors waste processing link at the BIOS-4 experimental facility today. To date, existing installations or conceptual solutions for their development, including automation, are presented for all the main links of the technological chain of waste processing with reference to the bio technical life support systems for space purposes, and their optimization and experimental verification are carried out.

Keywords: human spaceflight, closed life support systems, turnover, technological processes, waste treatment, fertilizers, automation.

Введение. Для пилотируемых космических миссий длительностью более 2-х лет, начиная от полета на Марс и далее, а тем более для решения задач терраформирования планет и межзвездной экспансии, высокотехнологичные биолого-технические системы жизнеобеспечения (БТСЖО), включающие человека, являются необходимым компонентом космических аппаратов такого назначения. Процессы переработки органических отходов играют важную роль в формировании БТСЖО космического назначения, определяя размеры буферных емкостей и время автономного существования БТСЖО [1].

Отличие процессов получения пищи в земных и космических условиях заключается в очень жестких требованиях к минимизации массы всей системы в последнем случае. Многие земные технологии земледелия слишком трудоемки, масштабны, массивны и нетехнологичны для вывода их на орбиту и использования в период космической миссии. В то же время многие космические технологии слишком дороги и нерентабельны для земных приложений, однако совершенно незаменимы в будущих космических миссиях. Для минимизации массы БТСЖО и повышения удельной полезности каждого килограмма выводимой на орбиту полезной нагрузки требуется резко повышать (в сравнении с биосферными циклами) скорости оборота веществ в экологических трофических циклах и снижать буферную емкость экосистем [2].

Снижение буферных емкостей в экосистемах порождает множество проблем устойчивости их функционирования [3]. Так, в планетарном масштабе регулирование газового состава атмосферы происходит естественным образом благодаря очень большой буферности атмосферы, в то время как в герметичной кабине БТСЖО объем атмосферы очень мал и требует тщательного контроля [4] для выравнивания всплесков концентраций различных газовых компонентов, как технологическими способами (подбор шага конвейеров различных культурных растений), так и дополнительными техническими средствами (например, управляемый различной логикой микроводорослевый фотобиореактор, имеющий большой диапазон интенсивностей фотосинтеза).

Естественная биodeградация отмерших и полупереваренных растительных и животных органических остатков и традиционные практики их компостирования в земных условиях требуют слишком массивных буферных емкостей [5], что неприемлемо для БТСЖО космического назначения. Поэтому в БТСЖО космического назначения представляется целесообразным разрабатывать различные подсистемы физико-химических реакторов [6], которые выполняют роль редуцентов в экосистеме. В процессе исследований такие подсистемы могут существенно варьироваться и оптимизироваться. Отлаженные технологические процессы, которые уже претерпевают существенные структурные изменения, подлежат автоматизации. Их снабжают датчиками для контроля состояния среды БТСЖО, надстраивают системы управления физико-химическими реакторами, объединяя их во все более сложные модули и систему управления БТСЖО как единое целое. В данной статье рассматриваются ведущиеся в ИБФ СО РАН разработки подсистемы физико-химических реакторов переработки органических отходов в удобрения для выращивания культурных растений на гидропонике [7].

Целью данной статьи является обзор особенностей оригинальных технологий и разработок физико-химических реакторов переработки органических отходов применительно к биолого-техническим системам жизнеобеспечения нового поколения с высокой степенью замыкания круговоротных процессов и их особенностей. Работы ведутся на кафедре ЗЭС СибГУ, являющейся базовой кафедрой ИБФ СО РАН.

Подсистема физико-химических реакторов. Объектом исследования является технологическая подсистема физико-химической переработки органических отходов в удобрения для растений, а также автоматизация, мониторинг и управление вышеуказанными процессами. Проблемы исследования заключаются в поиске путей повышения степени замкнутости, технологичности и надежности отдельных звеньев технологической подсистемы переработки органических отходов, уменьшении массы БТСЖО в расчете на члена экипажа, а также в автоматизации, мониторинге и управлении вышеуказанными процессами.

Весьма перспективным для искусственного физио-химического звена редуцентов в будущих БТСЖО с экипажем из нескольких человек представляется использовать принцип жидкофазного окисления органических отходов активными формами кислорода в водной среде. H_2O_2 на сегодня является наиболее экологически чистым, эффективным и легко воспроизводимым во внутрисистемном круговороте видом окислителя. Разрабатываемая последовательная технологическая подсистема переработки органических отходов для получения из них питательных растворов для выращивания культурных растений, преимущественно на гидропонике, применительно к замкнутым экосистемам космического назначения состоит из трех основных реакторов: «мокрого сжигания», разложения мочевины и синтеза H_2O_2 . Упрощенная схема технологического процесса представлена на рис. 1.

Сначала органические отходы (в первую очередь экзометаболиты человека, а также, возможно, несъедобная биомасса растений, рыбные отходы и т. д.) смешиваются с 33%-м водным раствором H_2O_2 и через сутки поступают в реактор «мокрого сжигания» [8]. Перекись водорода активируется переменным электрическим током [9], образуя радикалы $\bullet O$ и $\bullet OH$, которые запускают цепную реакцию окисления органических веществ в растворе. Получаемый на выходе «мокрого сжигания» продукт состоит из раствора, газа и небольших количеств осадка. Состав газовых компонентов и технология их вовлечения в круговоротные процессы БТСЖО описана в [10]. После процесса «мокрого сжигания» более 90 % мочевины остается в растворе.

Поскольку мочевина не усваивается многими культурными растениями, раствор вместе с осадком далее направляется в реактор разложения мочевины. Ранее использовалась технология разложения мочевины ферментом уреазы, получаемой из соевой муки [11]. Процесс проходил при простой механизации и не требовал специальной системы управления. В настоящее

время разрабатывается альтернативный метод разложения мочевины с помощью катализатора из платиновой фольги. Процесс автоматического управления реактором разложения мочевины на платине заключается в поддержании постоянного тока в цепи при меняющейся электропроводности раствора в результате нагрева и химических реакций, а также термостатирования при выходе реакции на рабочую температуру и отключении по прошествии заданного времени. В первом приближении такой процесс может осуществляться по жестко заданной по времени программе.

Доокисление осадка. После любого варианта процесса разложения мочевины осадок отстаивают и доокисляют в смеси $HNO_3 + H_2O_2$ в соотношении 1:1. Процесс извлечения элементов минерального питания высших растений из осадка в доступные формы в растворе описан в [12]. Необходимую для доокисления осадка и коррекции pH поливочных растворов на гидропонике азотную кислоту получают нитрификацией аммиака, связываемого в газовых скрубберах реакторов «мокрого сжигания» и разложения мочевины в 6 % HNO_3 . Процесс доокисления осадка, остающегося в продуктах «мокрого сжигания» раствора экзометаболитов человека в смеси $HNO_3 + H_2O_2$ (1:1), может проводиться в реакторе, аналогичном установке «мокрого сжигания», но меньшего размера, либо накапливаться за несколько дней и проводиться в основной установке. Поскольку HNO_3 сильно увеличивает электропроводность раствора, требуются существенно меньшие уровни напряжения. Количество HNO_3 определяется из предположения, что весь переходящий в газообразное состояние при первичном «мокром сжигании» раствора экзометаболитов NH_3 преобразуется нитрификатором в равное количество молей HNO_3 и возвращается полностью на доокисление осадка, к которому добавляется H_2O_2 в молярном соотношении 1:1. Обычно используется 4,18 мл 65%-го HNO_3 и 8,24 мл 33%-го водного раствора H_2O_2 на осадок с 1 л раствора экзометаболитов человека.

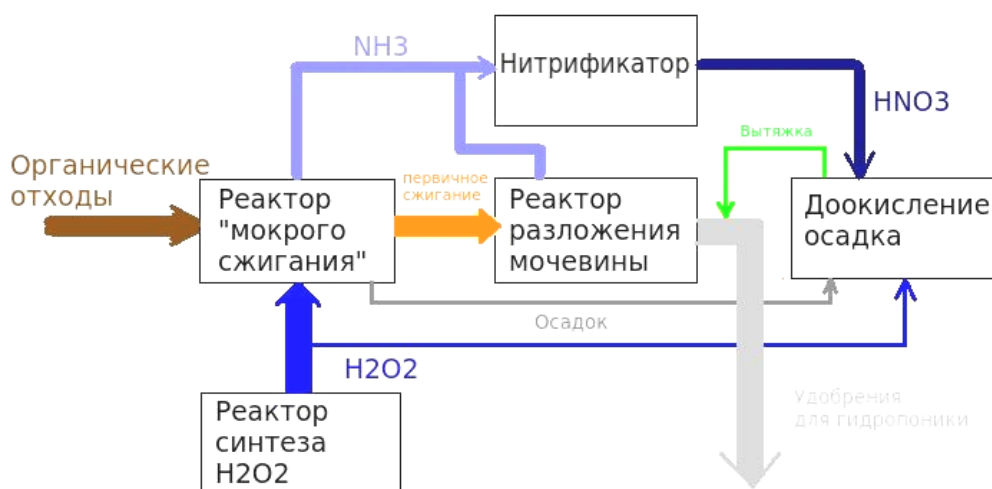


Рис. 1. Упрощенная схема технологической подсистемы переработки органических отходов для БТСЖО высокой степени замкнутости на примере проекта БИОС-4

Fig. 1. Simplified chart of organic wastes treatment technological chain for high-closure BTLSS on BIOS-4 project as example

Напряжение очень сильно зависит от площади поперечного сечения раствора между электродами и, следовательно, от заполняемости реактора. Обычно осадок с 9 л раствора минерализованных экзометаболитов с суммарным объемом кислоты перекиси и дистиллированной воды, используемой для смыва, порядка 300 мл разгоняют 5 мин при напряжении около 28 В, при этом ток вырастает с 3–5 до 7,5–10 А и раствор начинает кипеть (электропроводность раствора зависит также от его температуры), далее напряжение снижают до 14 В, при этом ток падает приблизительно до 3,5 А и находится на таком уровне порядка 2 часов до конца реакции. Конец реакции определяется отсутствием H_2O_2 в растворе при титровании перманганатом калия. Реакция доокисления осадка при фиксированных уровнях раствора может проводиться двумя переключениями через заданные интервалы времени, однако от уровня раствора в реакторе, связанного с его поперечным сечением, зависит ток в цепи и скорость реакции. Если уровни раствора не будут нормированы и стандартизированы, то для управления процессом потребуются следящая система, регулирующая напряжение для удержания значений тока в определенных пределах. Однако в большинстве случаев стандартизация процесса доокисления осадка по объемам компонентов выглядит более простым решением, позволяя сделать управление по жесткой программе.

Авторами разработана и экспериментально проведена на растениях салата, взятого в качестве тест-объекта, технология доокисления осадка от «мокрого сжигания» в водной смеси $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$. Более половины таких необходимых элементов минерального питания для высших растений, как Са, Mg, P, Fe и др., были ранее связаны в труднорастворимом осадке и недоступны для минерального питания. Удалось перевести более 90 % вышеперечисленных элементов минерального питания в ионную форму, доступную в растворе. Достигнуто увеличение продуктивности салата более чем в 2 раза при использовании питательного раствора, приготовленного из одинакового количества минерализованных экзометаболитов человека с использованием технологии растворения осадка, по сравнению с ранее использовавшейся технологической подсистемой [12], поскольку некоторые из выводимых в раствор элементов были лимитирующими для роста культурных растений в условиях максимального замыкания круговорота веществ. Проанализирована большая часть газовых компонентов процесса, ведутся работы по изучению динамики окисления остающихся от доокисления осадка в смеси $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$ небольших количеств воска в почвоподобном субстрате. Работы по вовлечению осадка от «мокрого сжигания» в круговорот БТСЖО обладают принципиальной новизной и делаются впервые в мире.

Модификация установки «мокрого сжигания». Была разработана, аппаратно и программно реализована и апробирована в течение более 2 лет регулярной работы система мониторинга в реальном времени с записью на компьютер параметров протекания процесса «мокрого сжигания» для реактора с рабочим объемом 6 л, разгонным напряжением 100 В и рабочим напряжением 50 В, а также автоматическое и/или дистанционное управление через компьютер вышеуказанной установкой [13].

В настоящее время изготовлен реактор «мокрого сжигания» с рабочим объемом 9 л для экипажа из 3 человек, который будет, в частности, оснащен подсистемой физико-химических реакторов приготовления удобрений из органических отходов и иными технологиями для высокозамкнутой БТСЖО нового поколения. Проблемой работы новой установки с таким реактором на 9 л оказалась измененная геометрия с меньшим расстоянием между электродами, изменилось соотношение тока и напряжения: 56 В – разгонное и 28 В – рабочее, при токе от 5–7 до 12–18 А. Материал стенок был заменен с керамики на фторопласт, и тщательно загерметизированы газовые пути. В результате тщательной герметизации газовых путей пороговое значение давления, сигнализирующее о переключении с разгонного напряжения на рабочее, стало достигаться слишком рано – через 10–15 мин, по сравнению с 60–90 мин для ранее отработанной керамической версии реактора с рабочим объемом 6 л, в результате раствор не успевал разогреться до рабочей температуры (95–100 °С), что увеличивает время протекания процесса и ухудшает качество продукта, оцениваемое по химическому потреблению кислорода. Для повышения теплоизоляции реактор был покрыт термоизоляционной пленкой, однако это не решило проблему.

У новой установки «мокрого сжигания» рабочим объемом 9 л изменяется логика работы автоматики, требуется еще одна ступень. Включение пеногасителя и катализатора происходит по достижении давления, равного высоте столба жидкости в колбе для связывания NH_3 , как и ранее, но переключение напряжения с разгонного на рабочие осуществляется по иному принципу – по достижении заданной рабочей температуры раствора (95 °С). Отключение установки происходит по разряжению –2 мм вод.ст., как и ранее. Также актуальна задача разработки аналогичной системы компьютерного мониторинга (хода процессов переработки и движения веществ) и автоматизации для остальных реакторов вышеуказанной технологической подсистемы для создания единой информационной системы управления экспериментальным стендом БТСЖО.

Целесообразным может оказаться автоматическая дозация H_2O_2 в ходе реакции при использовании процесса разложения мочевины с применением уреазы, получаемой из соевой муки, по заданным интервалам времени. Также возможна автоматическая дозация части H_2O_2 в ходе первичного процесса «мокрого сжигания», управляемая по току для сокращения расхода H_2O_2 .

Человеку для пищеварения необходимо потребление NaCl , в то время как для большинства культурных растений данный компонент является ингибитором и губителен в повышенных концентрациях. В этой связи требуется обессоливание питательных растворов для культурных растений с целью поддержания приемлемо низких концентраций NaCl в поливочных растворах. Для этого в настоящее время используются растения-галофиты [14]. Параллельно ведется разработка физико-химических методов обессоливания питательных растворов диализом [15], однако на данный момент галофиты более перспективны.

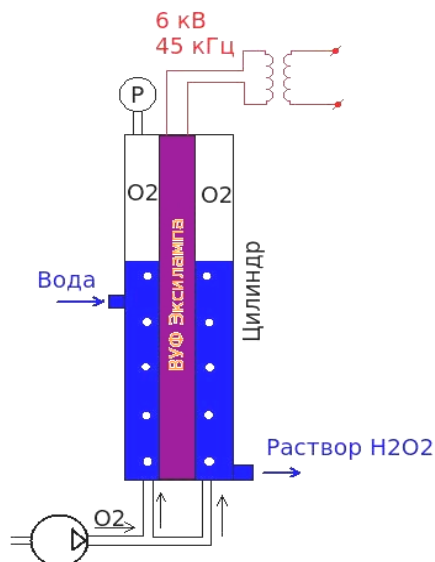


Рис. 2. Возможная схема синтеза H_2O_2 из внутрисистемной воды и электроэнергии применительно к БТСЖО космического назначения

Fig. 2. Probable H_2O_2 synthesis scheme from intra-system water and electricity for space application BTLSS

Синтез перекиси водорода. Процесс синтеза H_2O_2 является самым энергоемким в предполагаемой искусственной физико-химической части звена редуцентов. Наиболее важной на сегодня задачей для запуска эксперимента по замыканию системы нового поколения БИОС-4 с людьми, как первого значимого шага экспериментальной проверки существующих на сегодня концептуальных решений для полетной версии БТСЖО, является создание энергоэффективной, не выделяющей токсичных газов, технологичной и легко встраиваемой в существующую схему круговоротных процессов БТСЖО установки синтеза H_2O_2 из электроэнергии и имеющихся в системе потоков веществ. Преобладающий сегодня в промышленности антрохиноновый процесс синтеза H_2O_2 крайне проблематично использовать для БТСЖО из-за сложности, объемности и массивности технологической подсистемы, а также потребности в реагентах.

Ранее синтез H_2O_2 предполагалось осуществлять из кислорода и растворов минерализованных экзотебололитов на газодиффузионных электродах по процессу, описанному в [16]. Однако основным недостатком этого метода является крайне низкий срок службы газодиффузионных электродов, необходимость их частой замены и трудность воспроизводства в рамках БТСЖО, что увеличивает ее общую массу. В настоящее время параллельно ведутся исследования по разработке реактора синтеза H_2O_2 из воды и кислорода под давлением с помощью ионизации насыщенного кислородом слоя жидкости эксилампой в диапазоне длин волн вакуумного ультрафиолета (ВУФ). Из всех процессов физико-химической переработки отходов процесс синтеза H_2O_2 в любой реализации – наиболее энергоемкий, даже при достижении теоретического минимума энергопотребления [15].

Известный процесс синтеза H_2O_2 катодным восстановлением кислорода на газодиффузионном элект-

роде применительно к БТСЖО имеет существенный недостаток – крайне низкий срок службы газодиффузионных пористых электродов и трудность их изготовления в условиях БТСЖО. В настоящее время авторы ведут подготовку эксперимента по синтезу H_2O_2 из внутрисистемной воды, барботируемой кислородом под давлением под воздействием вакуумного ультрафиолета или ионизирующих излучений (рис. 2).

Проводятся теоретические исследования для определения оптимальной длины волны ВУФ эксилампы или конструкции ионизатора, а также повышения эффективности процесса с помощью катализаторов.

Планируется провести серию экспериментов для получения поверхности оптимума эффективности процесса синтеза H_2O_2 в зависимости от следующих факторов:

1. Длина волны. Эксилампы на галогенидах излучающие в ВУФ-диапазоне, имеют определенные пики мощности для каждого вида галогена. Нужно подобрать наиболее эффективные длины волн для синтеза H_2O_2 , поскольку проблема данного метода заключается в том, что ВУФ-излучение одновременно интенсивно синтезирует и разлагает H_2O_2 , и на некоторых длинах волн на разложение H_2O_2 идет до 90 % энергии, идущей на синтез.

2. Интенсивность излучения. Поиск баланса между затрачиваемой мощностью и выходом реакции.

3. Давление атмосферы из чистого O_2 внутри реактора. Давление повышает интенсивность и эффективность реакции, однако чем выше давление, тем необходимы более мощные насосы для нагнетания O_2 и более массивная камера для удержания создаваемого давления.

4. Толщина слоя воды. ВУФ-излучение сильно поглощается водой, более 90 % мощности задерживается в единицах мм слоя воды.

5. Скорость потока. С одной стороны, чем выше скорость потока, тем больше продукта получается,

с другой стороны, концентрация H_2O_2 ниже. Нужно определить, при какой скорости потока получается максимальный выход молей H_2O_2 на единицы затрачиваемой энергии при приемлемых объемах и буферных массах.

6. Интенсивность барботажа. Насыщенность слоя воды кислородом должна быть такой, чтобы обеспечивать максимальный выход продукта при минимальных энергозатратах.

7. Катализаторы и стабилизаторы. H_2O_2 – активный окислитель и нестабильное соединение. Для стабилизации H_2O_2 используются ZnO , $Zn(MnO_4)_2$ и другие вещества [17], которые не выделяются из потоков веществ в имеющемся круговороте БТСЖО. Расход катализаторов и стабилизаторов и их попадание в питательные растворы должны быть пренебрежимо малы, если они вредны для человека и/или тяжело восстанавливаются в рамках БТСЖО.

Иные параметры процесса, которые могут оказаться существенными, если их варьирование технически реализуемо доступными средствами.

После получения данной поверхности оптимума процесса будет возможно создание полномасштабной установки, синтез алгоритмов и системы управления реактором синтеза H_2O_2 . Второй возможный подход заключается в поиске путей существенного продления срока службы электродов и облегчения процесса их воспроизводства в системе для процесса, описанного в [16].

Заключение. Представлено современное состояние разработок искусственного высокопроизводительного звена редуцентов – технологической подсистемы физико-химических реакторов, включая принципы их автоматизации, для искусственных высокзамкнутых экосистем космического назначения. Полученные результаты и ведущиеся авторами в настоящее время исследования по доработке технологической схемы процессов последовательной переработки отходов в удобрения являются частью большого цикла работ по развитию высокзамкнутых БТСЖО космического назначения. Представляется, что данные разработки могут быть востребованы при освоении среднего и в долгосрочной перспективе дальнего космоса, начиная от исследовательских баз на Марсе и других планетах, до решения задач отдаленной перспективы терраформирования и межзвездной колонизации.

Благодарности. Работы по переходу от аналоговой схемы управления к цифровой, созданию программы пользовательского интерфейса и обработки данных установки «мокрого сжигания», а также доокислению осадка и вовлечению его в круговорот веществ БТСЖО, получены при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект 14-14-00599) в ИБФ СО РАН. Остальные работы выполнены в рамках реализации интеграционного проекта № 5 (блок № 4) СО РАН и государственного задания ИБФ СО РАН по теме № 56.1.4. на 2013–2020 годы.

Acknowledgements. Work on changing analog control scheme to digital, user program interface development and data processing of “wet incineration” installation, as well as sediment further oxidation and its involvement into BTLSS matter turnover were conducted

with the financial support of the Russian Scientific Foundation grant (project 14-14-00599) at IBP SB RAS. Other works were conducted in the framework of the integration project number 5 (unit number 4) of the SB RAS and the Institute of Biophysics SB RAS State task theme № 56.1.4. for 2013–2020.

Библиографические ссылки

1. Gitelson J. I., Lisovsky G. M., MacElroy R. Man-made Closed Ecological Systems / Taylor & Francis Inc. 2003. 400 p.
2. Biological life support systems for a Mars mission planetary base: Problems and prospects / A. A. Tikhomirov [et al.] // *Advances in Space Research*. 2007. Vol. 40, iss. 11. Pp. 1741–1745. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.11.009>.
3. Барцев С. И. Отношение подобию и редукция сложности моделей экосистем // Математическое моделирование в экологии. ЭкоМатМод–2009 : материалы конф. Пушино, 2009. С. 25–26.
4. Замкнутая система: человек – высшие растения / под ред. Г. М. Лисовского. Новосибирск : Наука, 1979. 160 с.
5. Биофизика. Открытый учебник [Электронный ресурс] / под ред. С. И. Барцева. Красноярск, 2017. 184 с. URL: <http://build.molpit.org/pub/biophysics/tutorial.pdf> (дата обращения: 22.08.2017).
6. MELISSA: a loop of interconnected bioreactors to develop life support in Space / F. Gòdia [et al.] // *Journal of Biotechnology*. 2002. Vol. 99, iss. 3. Pp. 319–330. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(02\)00222-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(02)00222-5).
7. Возможные пути включения экзометаболитов человека в массообмен биологической системы жизнеобеспечения / С. А. Ушакова [и др.] // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2009. Т. 43, № 2. С. 61–63.
8. Перспективы использования «мокрого сжигания» органических отходов в перексиде водорода для замкнутых систем жизнеобеспечения / С. В. Трифонов [и др.] // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2014. Т. 22, № 2. С. 203–208.
9. Устройство оптимизированной утилизации отходов жизнедеятельности человека и несъедобной биомассы растений, приводящее к получению из них удобрений : пат. 146378 Рос. Федерация : МПК С 05 F 3/00 (2006.01) / Морозов Е. А., Трифонов С. В., Куденко Ю. А. и др. Опубл. 10.10.2014, Бюл. № 28.
10. Assessing the feasibility of involving gaseous products resulting from physicochemical oxidation of human liquid and solid wastes in the cycling of a biotechnical life support system / A. Tikhomirov [et al.] // *Adv. in Space Res.* 2012. Vol. 49. P. 249–253.
11. Физико-химическая переработка экзометаболитов человека для замкнутых систем жизнеобеспечения / Е. Ф. Сутормина [и др.] // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2011. Т. 19. С. 413–420.
12. Development of human exometabolites deep mineralization method for closed ecosystems / A. A. Tikhomirov [et al.] // *Doklady Akademii Nauk, Doklady Biochemistry and Biophysics*. 2016. Vol. 470. P. 316–318.

13. Компьютерная автоматизация установки «мокрого сжигания» органических отходов для замкнутых экосистем / М. Ю. Салтыков [и др.] // Вестник СибГАУ. 2017. Т. 17, № 2. С. 438–443.

14. Possibility of *Salicornia europaea* use for the human liquid wastes inclusion into BLSS intrasystem mass exchange / N. A. Tikhomirova [et al.] // *Acta Astronautica*. 2008. Vol. 63. Pp. 1106–1110.

15. Tikhomirov A. A., Kudenko Yu. A., Trifonov S. V. Physicochemical Conversion of Human Exometabolites for the NaCl Involvement into the Mass Exchange in Closed Life Support Systems // *Doklady Akademii Nauk*. 2016. Vol. 466, № 1. Pp. 114–116. DOI: 10.1134/S1607672916010051.

16. Электросинтез перекиси водорода из кислорода в газодиффузионных электродах в растворах минерализованных экзометаболитов / Г. А. Колягин [и др.] // *Электрохимия*. 2013. Т. 49, № 10. С. 1120–1124. DOI: 10.7868/S0424857013100095.

17. Schumb W. C., Satterfield C. N., Wentworth R. L. *Hydrogen peroxide* / A. C. S. Monograph. No. 128. New York : Reinhold Publishing Corporation, 1955. 759 p.

References

1. Gitelson J. I., Lisovsky G. M., MacElroy R. *Man-made Closed Ecological Systems*. Taylor & Francis Inc., 2003, 400 p.

2. Tikhomirov A. A., Ushakova S. A., Kovaleva N. P., Lamaze B., Lobo M., Lasseur Ch. Biological life support systems for a Mars mission planetary base: Problems and prospects. *Advances in Space Research*. Vol. 40, Iss. 11, 2007, P. 1741–1745. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.11.009>.

3. Bartsev S. I. [Similarity relationships and complexity reduction in ecosystems models]. *EcoMathMod 2009* [Materials Scientific Conf. “Mathematical modelling in ecology”]. Puschino, Russia, 2011, P. 25–26 (In Russ.).

4. Lisovsky G. M. et al. *Zamknutaya sistema: chelovek – vishie rastenya*. [A closed system: human – higher plants]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1979, 160 p.

5. Biophysics. Open tutorial. Edited by S. I. Bartsev, Krasnoyarsk, 2017. 184 p. Available at: <http://build.molpit.org/pub/biophysics/tutorial.pdf> (accessed 22.08.2017).

6. Gòdia F., Albiol J., Montesinos J. L., Pérez J., Creus N., Cabello F., Mengual X., Montras A., Lasseur Ch. MELISSA: a loop of interconnected bioreactors to develop life support in Space. *Journal of Biotechnology*. 2002, Vol. 99, Iss. 3, P. 319–330. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(02\)00222-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(02)00222-5).

7. Ushakova S. A., Tikhomirov A. A., Kudenko Yu. A., Tikhomirova N. A., Anischenko O. V. [Possible ways of human exometabolites inclusion into mass turnover of biological life support systems]. *Aerospace and ecological medicine*. 2009, Vol. 43, No. 2, P. 61–63 (In Russ.).

8. Trifonov S. V., Kudenko Yu. A., Tikhomirov A. A., Klevetz V. V. [Prospects for using “wet” incineration of

organic waste in hydrogen peroxide for closed life support systems]. *Khimia v interesah ustoychivogo razvitiya*. 2014, Vol. 22, No 2, P. 203–208 (In Russ.).

9. Morozov Ye. A., Trifonov S. V., Kudenko Yu. A., Tikhomirov A. A., Degermendzi A. G. *A device for optimized treatment of human wastes and inedible plant biomass for production of fertilizers*. Patent No. 146378, Russia, 2014.

10. Tikhomirov A. A., Kudenko Yu. A., Trifonov S. V., Ushakova S. A. Assessing the feasibility of involving gaseous products resulting from physicochemical oxidation of human liquid and solid wastes in the cycling of a bio-technical life support system. *Advances in Space Research*. 2012, Vol. 49, P. 249–253. DOI: 10.1016/j.asr.2011.10.003.

11. Sutormina E. F. Trifonov S. V., Kudenko Yu. A., Ivanova Yu. A., Pinaeva L. G., Tikhomirov A. A., Isupova L. A. [Physico-chemical treatment of human exometabolites for closed life support systems]. *Khimia v interesah ustoychivogo razvitiya*. 2011, Vol. 19, P. 413–420 (In Russ.).

12. Tikhomirov A. A., Trifonov S. V., Morozov E. A., et al. Development of human exometabolites deep mineralization method for closed ecosystems. *Doklady Akademii Nauk, Doklady Biochemistry and Biophysics*. 2016, Vol. 470, P. 316–318 (In Russ.).

13. Saltykov M. Yu., Morozov Ye. A., Trifonov S. V., Murygin A. V., Tikhomirov A. A. [Computer automation of organic wastes “wet incineration” installation for closed ecosystems]. *Vestnik SibGAU*. 2017, Vol. 17, No. 2, P. 438–443 (In Russ.).

14. Tikhomirova N. A., Ushakova S. A., Tikhomirov A. A. et al. Possibility of *Salicornia europaea* use for the human liquid wastes inclusion into BLSS intrasystem mass exchange. *Acta Astronautica*. 2008, Vol. 63, P. 1106–1110.

15. Tikhomirov A. A., Kudenko Yu. A., Trifonov S. V. [Physicochemical Conversion of Human Exometabolites for the NaCl Involvement into the Mass Exchange in Closed Life Support Systems]. *Doklady Akademii Nauk*. 2016, Vol. 466, No. 1, P. 114–116. DOI: 10.1134/S1607672916010051.

16. Kolyagin G. A., Kornienko V. L., Kudenko Yu. A., Tikhomirov A. A., Trifonov S. V. [Electrosynthesis of hydrogen peroxide from oxygen in gas-diffusion electrode in solutions of mineralized exometabolites]. *Russian Journal of Electrochemistry*. 2013, Vol 49, No. 10, P. 1120–1124 (In Russ.). DOI: 10.7868/S0424857013100095.

17. Schumb W. C., Satterfield C. N., Wentworth R. L. *Hydrogen peroxide*, A. C. S. Monograph No. 128. Reinhold Publishing Corporation, New York, 1955, 759 p.

© Морозов Е. А., Трифонов С. В., Салтыков М. Ю., Мurygin А. В., Тихомиров А. А., 2017

THE STUDY OF THE FLOW IN THE VAPOUR CHANNEL OF SHORT LINEAR HEAT PIPES

A. V. Seryakov

LLC Research and Development Company “Rudetransservice”,
55, Nekhinskaya Str., Veliky Novgorod, 173025, Russian Federation
E-mail: seryakovav@yandex.ru

The results of studies of flow of moist vapour in Laval-like vapour channels of short linear heat pipes (HPs) are presented. The increase in heat transfer coefficient of short linear HPs, intended for creation of the cooling systems of heat-stressed designs of spacecraft, is carried out by making the HPs vapour channel forms similar to the shape of the Laval-like nozzle. Comparison of the heat transfer coefficients of short HPs with the standard cylindrical vapour channel and the channel, made in the form of the Laval-like nozzle with the equality of all dimensions, flat evaporator and the same amount of the working fluid, shows that the HPs with the vapour channel in the form of the Laval-like nozzle exceeds the heat transfer characteristics of the standard HPs with a cylindrical vapour channel under high thermal loads. The study of the flow and condensation in such shaped vapour channels of the short HPs at high thermal loads gives an opportunity to analyze in detail the advantages of using such HPs and make the conclusion about the necessity of wide introduction of such HPs for the cooling systems of the spacecraft. Capacitive sensors were additionally installed in cooled top covers of the HPs, and electromagnetic pulses with a frequency of 100 kHz were supplied to them from the external generator. At heating the HPs evaporator, starting from a certain thermal power threshold value, electromagnetic pulses became modulated. It is related to the formations of the boiling process in the capillary-porous evaporator and large amount of vapour over it and its discontinuous distribution. It was discovered that the frequencies of the pulsations are more and they occur at lower values of heat load at the evaporator in the HPs with a vapour channel of a Laval-like nozzle, compared to the HPs with the standard cylindrical vapour channel with equal overall dimensions.

Keywords: Heat pipes, Laval nozzle, pulsation, heat transfer coefficient.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 3. С. 592–603

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ В ПАРОВОМ КАНАЛЕ КОРОТКИХ ЛИНЕЙНЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

А. В. Серяков

ООО «Рудетранссервис»
Российская Федерация, 173025, г. Великий Новгород, ул. Нехинская, 55
E-mail: seryakovav@yandex.ru

Представлены результаты исследований течения влажного пара в выполненных в виде сопла, близкого к соплу Лаваля, паровых каналах коротких линейных тепловых труб (ТТ).

Повышение коэффициента теплопередачи коротких линейных ТТ, предназначенных для создания систем охлаждения теплонапряженных конструкций космических аппаратов, осуществляют за счет придания паровому каналу ТТ формы сопла, близкого к соплу Лаваля.

Сопоставление коэффициентов теплопередачи коротких ТТ со стандартным цилиндрическим паровым каналом и с выполненным в виде сопла, близкого к соплу Лаваля, паровым каналом при равенстве всех габаритных размеров, плоском испарителе и одинаковом количестве рабочей жидкости показывает, что ТТ с паровым каналом в виде сопла, близкого к соплу Лаваля, превосходят в теплопередающих характеристиках стандартные ТТ с цилиндрическим паровым каналом при высоких тепловых нагрузках. Изучение особенностей течений и конденсации в таких профилированных паровых каналах коротких ТТ при высоких тепловых нагрузках дает возможность детально проанализировать преимущества применения подобных ТТ и сделать вывод о необходимости их широкого внедрения для систем охлаждения космических аппаратов.

В охлаждаемые верхние крышки ТТ дополнительно установлены емкостные датчики, на электроды которых от внешнего генератора были поданы электромагнитные импульсы частотой 100 кГц. При нагревании испарителей ТТ, начиная с некоторой пороговой тепловой нагрузки, электромагнитные импульсы становятся модулированными. Это связано с началом кипения в капиллярно-пористом испарителе, образованием большого количества пара и его прерывистым распространением. Обнаружено, что частоты пульсаций большие и возникают они при меньших величинах тепловой нагрузки на испаритель в ТТ с паровым каналом, выполненном

в виде сопла, близкого к соплу Лаваля, по сравнению с ТТ со стандартным цилиндрическим паровым каналом при равных габаритных размерах.

Ключевые слова: тепловые трубы, сопло Лаваля, пульсации, коэффициент теплопередачи.

Introduction. The increase of heat transfer coefficient of short linear HPs is a very important task when designing a spacecraft with a rigid regulation of take-off weight. The application of the linear HPs is justified in case of structural impossibility of placing a loop (contoured) HPs for it can improve long-term reliability of the cooling systems, which are distributed inlet and outlet closed lines of the loop (contour) HPs.

Pulsating (or oscillating) loop HPs – siphons, was invented in 1990 by Akachi [1]. When the temperature difference between evaporator and condenser exceeds a certain threshold, Tong et al. [2], R. Naik, et al. [3], the vapour bubbles and condensate liquid plugs begin to oscillate spontaneously back and forth. The amplitude of oscillations is quite strong and the liquid plugs penetrate into both condenser and evaporator. The heat is thus transferred not only by the latent heat transfer liquid-vapour-liquid like in other types of heat pipes, but also by conductive heat transfer of the hot oscillating liquid plugs to cold walls in the condensation zone of loop HPs. This phenomenon is the reason of high heat transfer coefficient of loop HPs in comparison with other types of HPs.

The increase of the heat transfer coefficient in short linear open HPs with capillary porous insert is achieved using inner vapour channel of Laval-like nozzle form. There is an availability to use a jet vapour nozzle, similar to the Laval nozzle, surrounded by a capillary-porous insert along the full length of the HPs, in case if the heat flow is axially directed that is typical for short HPs. The shape of this vapour Laval-like channel, is defined by the inner capillary porous insert. The implementation of the nozzle increases flow velocity [4], pulse rate of two-phase vapour flow and heat-transfer coefficient in the HPs. Pulsation of the flow in short linear HPs with the capillary porous insert represents more complex phenomena, associated with boiling of the working fluid in the capillary porous evaporator.

Heat-transfer coefficient and operational effectiveness of short linear HPs with capillary-porous inserts and Laval-like vapour channel are defined by closed circulation motion of the working fluid, which undergoes liquid-vapour transition and heat absorption in the evaporation region of the capillary porous insert, vapour phase transfer through a convergent-divergent vapour channel, vapour-liquid transition with heat liberation in the condensation region, and liquid return to the evaporation region through capillary-porous inserts of the HP.

Improvement of the heat-transfer coefficient of heat pipes is a complex task, concerning the device's detailed mechanical design and gas dynamics. Flowing vapour, with microdrops of condensate, appears as a nonlinear flow, with attendant internal processes, such as interphasic heat and mass exchange, and power dissipation, Gupta et al [5]. Static regain of supersaturated vapour flow in the diffuser condensation region of the HPs with turbulator, causes flow stagnation, strong vorticity production near the condensation surface and reverse vapour flow.

Thermal load-related processes of vorticity formation and density and pressure fluctuation, proceeding in the convergent-divergent vapour channel of HPs, are of the utmost interest. For a field research of these processes, stainless steel heat pipes have been manufactured with diethyl ether as the working fluid [6–9].

Materials and methods. The diethyl ether $C_4H_{10}O$ is selected as the main working fluid, which has the boiling temperature $T_B = 308.55$ K (35.4 °C) under the atmospheric pressure, freezing temperature $T_F = 156.95$ K (–116.2 °C) and critical parameters $T_C = 466.55$ K (193.4 °C), $P_C = 3.61$ MPa. Successful use of diethyl ether as the working fluid for Wilson chambers, on long liquid phase at 413.15 K (140 °C), shows its heat resistance and allows using it as the HP working fluid.

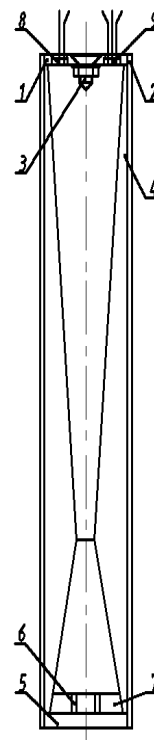


Fig. 1. Layout of HP equipped with capacitance sensors: 1 – flat upper lid with a smooth surface; 2 – cylinder body of HP; 3 – cone-shaped turbulence agitator; 4 – capillary-porous insert defining the vapour channel's form; 5 – flat bottom lid; 6 – injector channels; 7 – capillary-porous evaporator; 8, 9 – capacitance sensors, one of which is intended for a condensate film thickness measurement, while another one has a sensing element of CT3-19 thermistor mounted on its electrodes to measure the film temperature [11]

Рис. 1. Схема тепловых труб:

1 – верхняя крышка; 2 – цилиндрический корпус ТТ; 3 – конический турбулизатор; 4 – капиллярно-пористая вставка; 5 – нижняя крышка; 6 – инжекторные каналы; 7 – капиллярно-пористый испаритель; 8, 9 – емкостные датчики конденсации, измеряющие толщину слоя жидкого конденсата. Измерительная поверхность емкостных датчиков совпадает с внутренней поверхностью плоской верхней крышки

The developed sensor enables us to perform measurements of local characteristics of the film flows primarily, the film thickness and temperature, without making any major disturbances in the flow. To measure the fluid condensate of film thickness, short HPs were used with vapour channel made in the form of a Laval-like nozzle [10–12]. The HPs are described in details below.

The capillary-porous evaporator 7 is constructed of 43 circular layers of thin stainless steel net (fig. 1). Each layer is 0.07 mm thick with the mesh size of 0.04 mm and the aggregate thickness of 3 mm; all layers are spot-welded to the flat bottom lid 5. Outer diameters of the circular layers gradually decrease in such a manner that the lateral side of the assembled evaporator forms a pointed cone with a 45° total point angle that aligns with the angle of the end part of the capillary-porous insert 4. The evaporator as a whole is further equipped with 4 vapour injection channels 6 with increasing diameter of 1 mm, 1.1 mm, 1.2 mm and 1.3 mm diameter that are inclined to the longitudinal axis of HP at a specific angle and create a swirling jet stream of vapour.

The capillary-porous insert 4 is assembled on a dedicated profiled frame made of layers of thin stainless steel net same as the evaporator. Each layer is 0.07 mm thick with mesh size of 0.04 mm, the total thickness of the insert is 1.5 mm at the edges and 7.5 mm at the critical diameter of the inner nozzle. All layers of the insert are radially stitched together along the forming insert with a thin wire 0.05 mm in diameter and stitch spacing of 5–7 mm. Eight lines of the wire stitches that radially fix the net layers together are tilted by 45° towards each other and form a rigid structure of the capillary-porous insert with an inner vapour channel made in the form of a nozzle, similar to the Laval nozzle. At the edge of insert 4 that is adjacent to the evaporator 7, an end portion is placed; its total angle is somewhat wider than that of the diffuser portion of the vapour channel and equals 45°. The longitudinal length of the end portion is 3 mm and matches the thickness of the evaporator 7 exactly. The 45° angle of the end portion of insert 4 is formed by the gradually decreasing net layers' lengths, from the outer layer to the inner one, and matches the angle of the evaporator 7 exactly. The multilayered evaporator with a tapering lateral side is tightly inserted into the rigid capillary-porous insert 4 at the full length of the end portion and is spot-welded to it in 8 spots along the perimeter of the insert. After being cooled down at the boiling temperature of fluid nitrogen 77 K (–196 °C), the assembled capillary-porous insert together with the evaporator on the flat bottom lid 5 is tightly inserted in the stainless steel cylindrical shell 2 of the HP.

Porosity of the insert and evaporator is 72 % and together they form one hydraulic system designed to deliver the service fluid to the evaporator when the HP is operating. The HP length is 100 mm, its diameter is 20 mm, the max. diameter of the vapour nozzle in the convergent and divergent regions is 16 mm, the critical nozzle diameter is 4 mm, the length of the nozzle convergent region is 13 mm, the total angle of the convergent region is 41°, the length of the nozzle divergent region is 81 mm, the total angle of the divergent region is 8.5°, and the length of the cylindrical region in the nozzle throat section is 1 mm.

Measurement of the heat transfer coefficient. Condensation zones of the HPs are provided with insulated thermocouples and set into the vortex continuous-flow calorimeter, shown in fig. 2, with stabilized water flow.

To ensure accurate measuring of thermal power and heat removal augmentation in the HPs, jet flow of input water is swirled, values of flow velocity and vorticity due to air bubbles are recorded. The HPs evaporators, also equipped with thermocouples, is heated using a resistance heater, and the temperature is maintained at δT °C higher than the diethyl ether boiling temperature of 308.55 K (35.4 °C) under atmospheric pressure. The heater temperature is stabilized and HPs evaporator's overheat value is set in the range of $\delta T = 0\text{--}20$ K, herewith thermal power of single HP does not exceed 120 W.

Measurement were performed to disclose variability of the heat transfer coefficients in Laval-like HPs and with standard cylindrical vapor channel. The heat transfer coefficients in HPs, Faghri [13] is defined by the formula:

$$K_{HP} = \frac{E}{F(z)(T_{ev} - T_{cond})}, \quad (1)$$

where K_{HP} is heat transfer coefficient of the HPs, W/K; E is thermal power, supplied in the evaporator of the HPs, W; $F(z)$ is surface area of the evaporator inside the vapour channel of the HPs, m²; T_{ev} is temperature of the evaporator, K; T_{cond} is temperature of the condensation surface, K.

Temperature of evaporator surface and condensation surface of HPs were measured using differential thermocouples copper-constantan, heat power E , W; transferred by condensations zones of HPs to the calorimeter, was defined by the formula:

$$E = G \cdot \left(C_{H_2O} - \frac{C_K}{\rho_{H_2O} V_0} \right) \cdot [T_K(\tau) - T_{K0}(\tau)], \quad (2)$$

where G is water flow in a vortex flow calorimeter, kg/s; C_{H_2O} is the specific heat of water, J/kg·K; C_K – the heat capacity of the calorimeter, J/K; ρ_{H_2O} is the density of water in the calorimeter, kg /m³; V_0 is the internal volume of the calorimeter, m³; $T_{K0}(\tau)$, $T_K(\tau)$ is the water temperature at the inlet and outlet of the calorimeter, K.

Input temperature of water at the calorimeter, temperature differences (heat value) of the flowing water at entrance and exit of the calorimeter were also measured using differential thermocouples copper-constantan, comparator P3003 and digital voltmeter V7-34A. Water flow rate was measured using ultrasonic flowmeter. Total measuring inaccuracy of the thermal power E of the HPs does not exceed 1.7 %.

Comparison of heat transfer coefficients in Laval-like HPs and HPs with standard cylindrical vapour channel with the equality of all dimensions showed following results, presented in fig. 3.

The increase of the heat transfer coefficient in the HP with a Laval-like vapour channel appears to be related to the emergence of a vortex ring near the condensation surface of the HP.

Numerical model details. Numerical simulations of the vortex flows inside a vapour channel of the Laval-like HPs have been performed in finite element modeling in CFD 10.0 code Fluent 6.3.26 2D under double precision axis-symmetric conditions. Navier–Stokes equations with measured boundary conditions were solved, i. e. using fixed temperature values of heat source and heat outlet. In the construction of the design model we used about 457233 finite elements with increased meshing at injection capillary channels sections, nozzle throat section and turbulence element. Fig. 4 shows a diagram of the vortex obtained by numerical simulation of CFD 10.0 code.

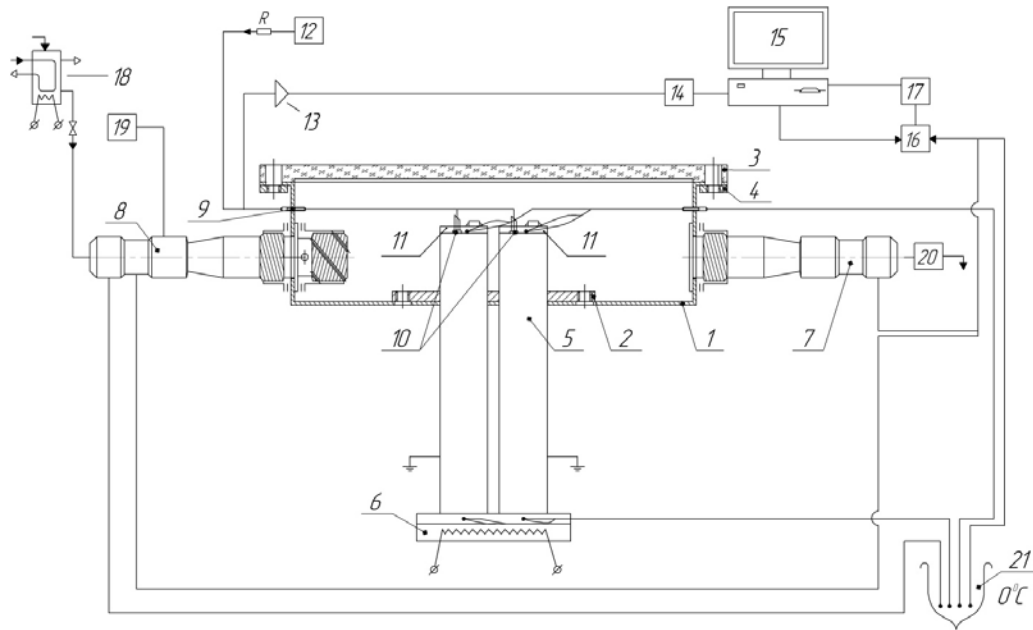


Fig. 2. Vortical calorimeter: 1 – vortical continuous-flow calorimeter; 2 – heat pipes bolting flange; 3 – glass cover; 4 – cover fastening; 5 – heat pipes; 6 – resistance heater; 7 – outlet stub tube for water flow; 8 – inlet stub tube for water flow; 9 – silicone sealant of the sensing wire; 10 – capacitive sensors for measuring the thickness of the condensed layer of the working fluid; 11 – the measuring and reference generators of the capacitive transducer; 12 – external digital generator; 13 – power assist element; 14 – digital oscilloscope; 15 – computer; 16 – commutation switch; 17 – digital voltmeter; 18 – container for constant water head; 19 – source of air bubble; 20 – water flow meter; 21 – vacuum-jacketed zero temperature container

Рис. 2. Вихревой калориметр: 1 – вихревой проточный калориметр; 2 – фланец крепления тепловых труб; 3 – стеклянная крышка; 4 – крепление крышки; 5 – тепловые трубы; 6 – резистивный нагреватель; 7 – выходной штуцер для воды; 8 – входной штуцер для воды; 9 – уплотнение измерительных проводов; 10 – конденсаторные датчики измерения толщины слоя конденсата; 11 – высокочастотные генераторы; 12 – генератор импульсов Г5-56; 13 – усилитель; 14 – осциллограф АКИП-4116/2; 15 – компьютер; 16 – коммутатор; 17 – вольтметр В7-34А; 18 – сосуд постоянного напора воды; 19 – генератор пузырьков воздуха; 20 – расходомер воды; 21 – сосуд Дьюара

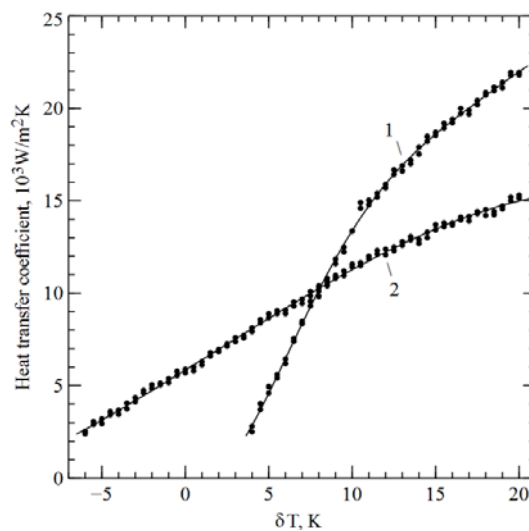


Fig. 3. Comparison of heat transfer coefficients in Laval-like HP and HP with standard cylindrical vapour channel: 1 – Laval-like HPs; 2 – HPs with standard cylindrical vapour channel

Рис. 3. Сравнение коэффициентов теплопередачи ТТ с паровым каналом в виде сопла, близкого к соплу Лаваля, и ТТ с цилиндрическим паровым каналом при равных габаритных размерах: 1 – ТТ с паровым каналом в виде сопла; 2 – ТТ со стандартным паровым каналом

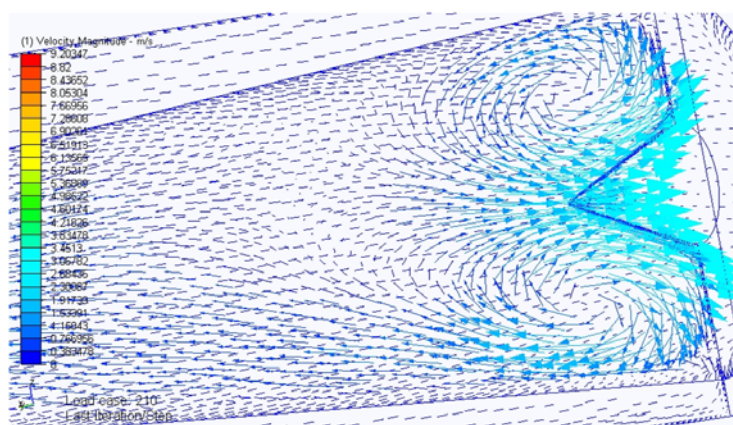


Fig. 4. The occurrence of a vortex ring near the condensation surface inside of Laval-like HPs. The numerical analysis of the flow in the Laval-like HPs condensation zone shows that the vortex structure has a spatial nature, at the same time the flow asymmetry becomes apparent being determined by non-linear friction against the underlying surface and the two-dimensional compressibility of the wet condensing vapour as well. Overheating of the evaporator in reference to the boiling temperature of diethyl ether at atmospheric pressure is 15 K, the temperature difference between the evaporator and the condensation surface equals 25 K

Рис. 4. Возникновение вихревого кольцевого течения вблизи поверхности конденсации вокруг турбулизирующего элемента внутри ТТ с паровым каналом в виде сопла, близкого к соплу Лавали. Перегрев испарителя относительно температуры кипения диэтилового эфира 15 K, разница температур между испарителем и поверхностью конденсации ТТ в калориметре 25 K

Fig. 5 shows the results of numerical analysis of the distribution of the longitudinal component of the velocity of compressible moist vapour within the Laval-like HP. The formation of a wet condensing vapour vortex ring near the condensation surface inside of Laval-like HPs leads to quite interesting results. Vortex ring is a highly gradient zone of the condensable moist vapour velocity with the opposite directions inside and outside the vortex ring. The numerical analysis of the velocity distribution along the centerline of the vapour channel in the Laval-like HPs including the vortex ring shows the occurrence of two positive peaks of the velocity, one of them is in the critical section of the nozzle and the other is near the condensation surface. In a critical section of the nozzle the axial component of velocity reaches 85 m/s, and near the condensation surface the counter-flow reaches the velocity of 33 m/s. The distribution of the axial component of velocity of the moist vapour shows the presence of a counter current due to the formation of a ring vortex within the vapour channel near the HPs condensation surface. This figure of the velocity distribution, shown in fig. 5, confirms the fact that the vortex ring is a zone of sharp velocity gradients, and consequently is a pressure gradient. In the central part the vortex ring has a noticeable positive dynamic pressure, and it has a negative dynamic pressure in the peripheral part of the vortex ring. This means that lower static pressure occurs in the central part of the vortex ring and this leads to additional absorption of moist vapor in the condensation zone of Laval-like HPs.

Apparently, this means that the static pressure in the vortex center in the Laval-like HP is less than the pressure in the axial part of the condensation zone of the HP with

standard cylindrical vapor channel. The appearance of high static pressure in the peripheral part of the vortex ring, where there is a negative dynamic pressure leads to intensification of the condensation process near the top cap of the Laval-like HPs that leads, apparently, to an increased value of heat transfer coefficient in the Laval-like HPs. This explains the reason why the heat transfer coefficient of Laval-like HPs becomes greater than that of HPs with the cylindrical vapor channel at boiling point in evaporator HP and there is formation of large amounts of vapor and increase in the efficiency of the nozzle in comparison with a cylindrical channel.

Measurement of pulse characteristics of HPs. The pulsation characteristics of HPs were measured and discussed previously [6; 7]. Starting from the specific overheating $\delta T_S = (T - T_B)$ of HPs evaporators, diethyl ether, which is the working fluid in the capillary-porous evaporators, starts to boil and produce large amount of vapour. The vapor pressure increases to values of P^* , at which the boiling point of diethyl ether is less than the evaporator temperature T_{ev} , and the process of evaporation stops.

The pressure pulsations with amplitude up to $3 \cdot 10^{-4}$ Pa spread through a vapour channel and condense in the cooled part of HPs. The vapor pressure decreases, the rarefaction wave comes to the evaporator and the next cycle of vapour formation and its moving to the HPs condensation zone begins.

The frequency of pulsations in the Laval-like vapour channel is larger than the pulsations in the HPs with the standard cylindrical vapour channel. The obtained values of the pulsations frequencies are given in table.

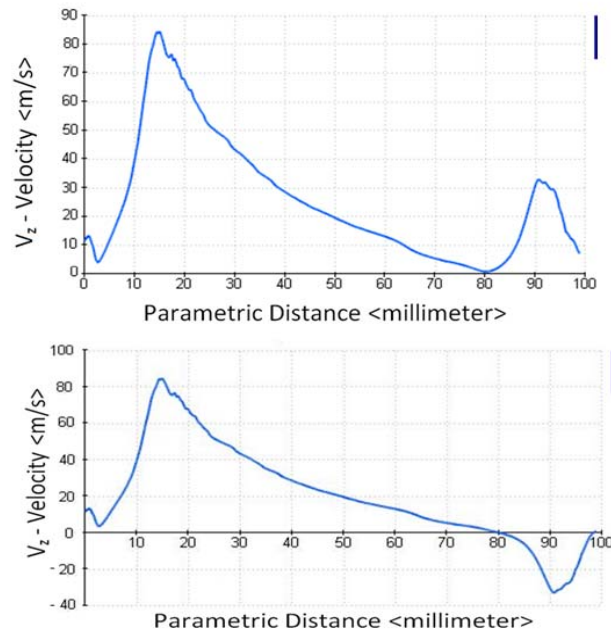


Fig. 5. The distribution of the axial component of velocity of the moist vapour inside the vapour channel of Laval-like HPs along the HPs centerline. Upper pattern with a positive velocity peak near the condensation surface of Laval-like HPs represents the velocity distribution along the longitudinal axis of vapour channel and inside the vortex ring. The figure on the bottom with a negative velocity value peak near the surface of condensation represents the velocity distribution along the longitudinal axis and outside of a vortex ring and shows the presence of a counter current due to the formation of a ring vortex near the HPs condensation surface. Overheating of the evaporator in reference to the boiling temperature of diethyl ether at atmospheric pressure is 15 K, the temperature difference between the evaporator and the condensation surface equals 25 K

Рис. 5. Распределение расчетных значений осевой составляющей скорости влажного пара внутри выполненного в виде сопла, близкого к соплу Лаваля, парового канала ТТ. Перегрев испарителя относительно температуры кипения диэтилового эфира 15 K, разница температур между испарителем и поверхностью конденсации ТТ в калориметре 25 K

Pulsation rate values

Overheating of the evaporator, δT , K	Pulsation frequency f_1 , Hz	Pulsation frequency f_2 , Hz
9.05	386 ± 5	—
10.1	396 ± 5	—
11.03	426 ± 5	406 ± 5
12.15	450 ± 5	420 ± 5
13.0	456 ± 5	437 ± 5
14.07	474 ± 5	440 ± 5
15.03	474 ± 5	454 ± 5
16.0	478 ± 5	453 ± 5
17.1	490 ± 5	460 ± 5
18.06	491 ± 5	472 ± 5
19.02	495 ± 5	473 ± 5
20.12	502 ± 5	474 ± 5

Table shows the pulsation rate values (modulation rate), obtained in the Laval-like HP, f_1 [Hz], and in the HP with standard cylindrical vapour channel, f_2 [Hz], depending on overheating δT , [K], of the evaporators.

Both HPs have equal outer diameters 20 mm and equal sectional areas of capillary-porous inserts near the condensation region. As the overheating of the evaporator $\delta T \sim 20$ K increases, pulsation frequency in the Laval-like nozzle goes up to ~ 502 Hz, the derivative of the relationship between pulsation frequency and temperature is approximately 10.5 Hz/K. While investigating HPs with standard cylindrical vapour channel and equal outer diameter of 20 mm, length of 100 mm and thickness of the evaporator and capillary-porous insert of 3 mm, initial pulsed flows occur in event of overheating of the evaporator $\delta T \sim 11$ K, frequency $f \sim 406$ Hz. As the overheating of the evaporator $\delta T \sim 20$ K increases, pulsation frequency in the cylindrical vapour channel goes up to 474 Hz, the derivative of the relationship between pulsation frequency and temperature is approximately 7.5 Hz/K.

The insensitivity zone of the capacity sensors in the cylindrical channel, defined by the initial convective nature of the vapour flow, is greater than in the vapour channel of Laval-like HPs. Measuring inaccuracy does not exceeds 3–5 Hz.

Numerical model details. Numerical simulations of the vortex pulsation flows inside a vapour channel of the Laval-like HP have been performed in finite element modeling in CFD 10.0 2D Fluent 6.3.26 under double precision axis-symmetric conditions. Navier–Stokes equations with measured boundary conditions were solved, using fixed temperature values of heat source and heat outlet. The model was studied as a longitudinal section along the axes of the two injector channels. It helps to preserve all the specific features of whirling instability under the conditions of continuous circulation motion of the working fluid during liquid and vapour phases. In the construction of the design model about 457233 finite elements were used, with increased meshing at injection capillary channels sections, nozzle throat section and turbulence element. The model size is a compromise between available computer resources and computational investigation error.

Transition from a stationary convective flow regime in the vapour channel to a pulsatile flow regime is clearly visible. At high heat capacity, received by the HPs, and boiling in the grid evaporator, excessive vapour occurs in the convergent part of the nozzle, leading to pressure increase up to the value, at which the average temperature of layers of the flat grid evaporator becomes lower than the boiling temperature of the working fluid, and boiling in the evaporator stops. Excessive vapour spreads through the divergent part of the vapour channel to the cooled area of the HP and is partially condensed. Due to the condensation effect, the pressure in the vapour channel decreases and the boiling process in the flat evaporator proceeds. Pressure increase period, vapour wave spreading in the condensation area of the HP and return expansion wave define the pulsation period in the vapour channel.

The results of flow simulation of compressible super-saturated vapour environment inside a vapour channel.

The figure presents test values of the vapour flow pulsation in the vapour channel in the Laval-like form of the HPs. There are seven steps of calculation of the moist vapour flow velocity, from up to down. When boiling in the capillary-porous insert and the initial velocity of the flow of the two-phase vapour directly over the surface of the evaporator is 0.5–1 m/s in the throat section of the nozzle the axial flow velocity reaches 5 m/s and more. Obvious occurrence of pulsations, pulsation frequency rises, what is consistent with the experimental results [6; 7].

Validation of numerical scheme. Evident conversion from convection mode to convection-vortex mode and then to pulsation mode of the vapour flow inside of the HP is recorded at evaporator overheating value $\delta T \sim 9$ K.

Maximum value of velocity of diethyl ether moist vapour flow, obtained using calculation method in the throat section of the vapour channel using the colour indication of the software CFD Design 10.0, reaches 100–110 m/s when pulsation occurs, fig. 5. This fact gives the opportunity to evaluate the Reynolds number Re of the vapour channel during pulsation, which is defined by the formula:

$$Re = \frac{\rho_{vp}^{mix} u_{vp} D_C}{\eta_{mix}}. \quad (3)$$

We substitute moist vapour density (vapour and drops) [14; 15] $\rho_{vp}^{mix} \sim 3$ kg/m³, dynamic coefficient of viscosity of the moist vapour $\eta_{mix} \sim 8 \cdot 10^{-6}$ Pa·s; maximum value of the vapour flow velocity (colour indication) near the throat section of the vapor channel $u_{vp} \sim (100–110)$ m/s; critical diameter of the vapour channel $D_C \sim 4 \cdot 10^{-3}$ m, and obtain the value $Re \sim (1.5–1.65) \cdot 10^5$, the Prandtl number $Pr = 0.77$.

Duration of the pulsation period $\Delta\tau_0$ inside the divergent part of the HPS vapour channel can be estimated using the formula:

$$\Delta\tau_0 \sim \frac{\Delta l}{u_{vp}}. \quad (4)$$

Then substitute values of distance between pulsation crests (maximums) obtained in fig. 6 $\Delta l \sim (2–3) \cdot 10^{-2}$ m, moist vapour flow velocity in divergent part of the vapour channel obtained using colour indication by the software CFD Design 10.0 $u_{vp} \sim (20–30)$ m/s, and you will obtain numerical value of duration of the pulsation $\Delta\tau_0 \sim (0.75–1.5) \cdot 10^{-3}$ s.

Analytical evaluation. Evaporation cycle in the HPs exist at low heat load of the evaporator, up to 4–6 W/cm², and is characterized by convective flow in the vapour channel. Evaporation cycle of short HPs, when evaporator heating power is constant and maximum value is limited to prevent the development of bubble boiling in the flat grid evaporator, is defined in the following way:

$$E = \frac{\Delta Q}{\Delta\tau} < E_B, \quad (5)$$

where ΔQ is heat energy, absorbed in the evaporator over a period of $\Delta\tau$, J; $\Delta\tau$ is time, sec; E_B is thermal power, wherein the process of bubble boiling begins in the grid evaporator, W.

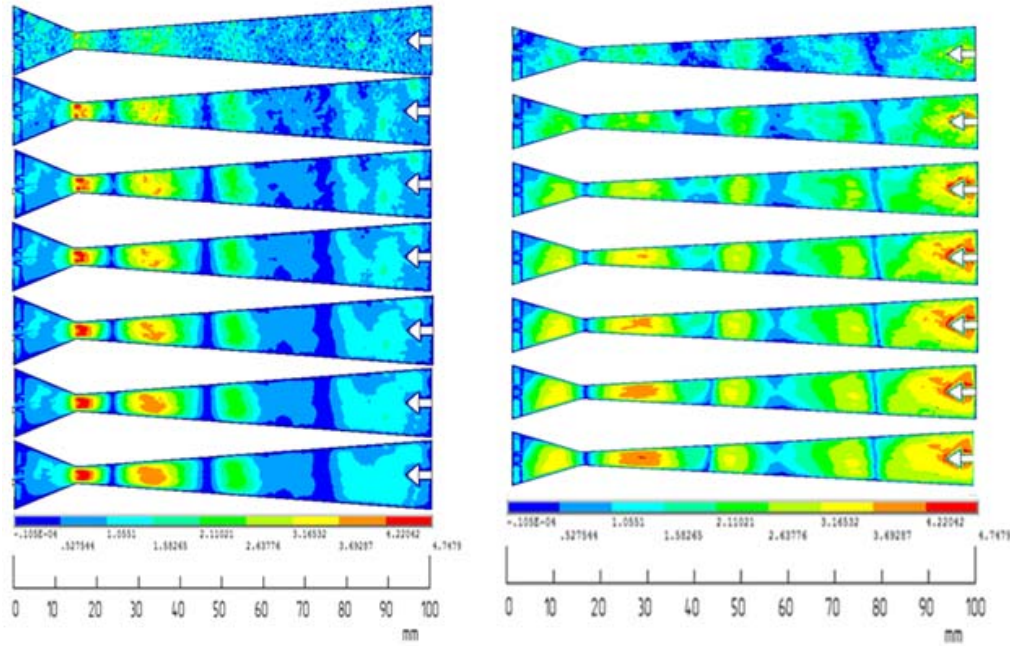


Fig. 6. The results of flow simulation of compressible supersaturated vapour environment inside a vapour channel. The figure presents test values of the vapour flow pulsation in the vapour channel in the Laval-like form of the HPs. There are seven steps of calculation of the moist vapour flow velocity, from up to down. When boiling in the capillary-porous insert and the initial velocity of the flow of the two-phase vapour directly over the surface of the evaporator is 0.5–1 m/s in the throat section of the nozzle the axial flow velocity reaches 5 m/s and more. Obvious occurrence of pulsations, pulsation frequency rises, what is consistent with the experimental results [6–7]

Rate of evaporation of dry monomolecular vapour over the evaporator is defined by the following equation:

$$\dot{M} = \dot{n}_{vp} m_{vp} = \frac{E}{r(T_B)}, \quad (6)$$

where $\dot{M}$ is the amount of the dry vapour, generated over the evaporator per time unit, kg/s; $\dot{n}_{vp}$ is the velocity of growth of the number of vapour molecules over the evaporator per time unit, s^{-1} ; m_{vp} is the mass of molecule of diethyl ether, kg; $r(T_B)$ is specific vaporization heat of the diethyl ether in HPs, depending upon temperature and pressure, J/kg; $T_B(P)$ is the boiling temperature of the diethyl ether, K.

Mass flow of saturated dry monomolecular vapour over the evaporator is defined by the following equation:

$$\begin{aligned} G_{vp} &= \dot{M} = F(z) n_{vp}(T_{ev}) m_{vp} u_{vp} = \\ &= F(z) \rho_{vp}(T_{ev}) u_{vp} = \frac{E}{r(T_B)}, \end{aligned} \quad (7)$$

where G_{vp} is a mass flow of dry saturated vapour over the evaporator, kg/s; $n_{vp}(T_{ev})$ is an average number of dry vapour molecules in the unit volume over the evaporator, m^{-3} ; u_{vp} is an average velocity of the vapour phase, m/s; $\rho_{vp}(T_{ev})$ is vapour density of diethyl ether over the evaporator, kg/m^3 ; T_{ev} is the temperature of the evaporator, K.

Growth rate of the number of molecules of vapour over the evaporator in the convergent region of the nozzle of the vapour channel, which defines excess pressure over

the evaporator and mass flow of vapour in HPs, is calculated from the equation:

$$\dot{n}_{vp} \cong \frac{E}{r(T_B) m_{vp}} = \frac{E N_A}{r(T_B) \mu_{vp}}, \quad (8)$$

where N_A is the Avogadro constant, mol^{-1} ; μ_{vp} is molar mass of diethyl ether vapour, kg/mol.

Assuming approximately equal velocities and without considering the jet type nature of the flow pattern, the linear velocity of the hydrodynamic flotation of the vapour flow over the evaporator surface is calculated from the equation:

$$\begin{aligned} u_{vp} &\cong \frac{\dot{n}_{vp}}{F(z) n_{vp}(T_{ev})} = \frac{E}{F(z) r(T_B) m_{vp} n_{vp}(T_{ev})} = \\ &= \frac{E N_A}{F(z) r(T_B) \mu_{vp} n_{vp}(T_{ev})}. \end{aligned} \quad (9)$$

Insert expressions (9) and (8) in the equation (7) to obtain the formula for calculation of molecular flow of the dry vapour over the evaporator:

$$G_{vp} \cong \rho_{vp}(T_{ev}) \frac{E N_A}{r(T_B) \mu_{vp} n_{vp}(T_{ev})}. \quad (10)$$

Hydrodynamic flow of saturated dry vapour is defined by pressure difference value between the evaporator and condensation region in HP, according to the formula:

$$\begin{aligned} G_{vp} &\cong A \frac{\rho_{vp}(T_{cond}) F(z)^2 (P(T_{ev}) - P(T_{cond}))}{\eta L} = \\ &= A \frac{F(z)^2 \Delta P_{vp}}{\eta L}, \end{aligned} \quad (11)$$

where A is nondimensional constant about a unit; η is coefficient of dynamic viscosity of dry vapour, Pa·s; L is the length of the vapour channel of the HPs, m; $P(T_{ev})$ is vapour pressure under the HPs evaporator, Pa; $P(T_{cond})$ is vapour pressure near the condensation surface of the HPs, Pa; ΔP_{vp} is vapour pressure difference over the evaporator and near the condensation surface in the vapour channel of the HPs, Pa; T_{cond} is temperature of the condensation surface, K.

Equate mass and hydrodynamic flow of saturated dry vapour, and obtain the following equation:

$$G_{vp} \cong A \frac{\rho_{vp}(T_{cond}) F(z)^2 (P(T_{ev}) - P(T_{cond}))}{\eta L} = \rho_{vp}(T_{ev}) \frac{EN_A}{r(T_B) \mu_{vp} n_{vp}(T_{ev})}. \quad (12)$$

Excess pressure over the evaporator defines transfer of the vapour flow in the vapour channel of the HPs, and is calculated in linear approximation according to the equation:

$$P(T_{ev}) \cong P(T_{cond}) + \frac{dP}{dT}(T_{ev} - T_{cond}). \quad (13)$$

With respect to the Clapeyron–Clausius equation, the pressure derivative of the vapour by temperature is calculated in a conventional manner, nevertheless considering the fact that for liquid the specific volume ratio is small, $v^L/v^{vp} < 10^{-2}-10^{-3}$, hence in the Clapeyron–Clausius equation the value of the specific volume of fluid v^L is ignored, and in ideal gas state the following equation is obtained:

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dT} &= \frac{1}{T} \frac{r(T)}{(v^{vp} - v^L)} \cong \frac{1}{T_{cond}} \frac{r(T_{cond})}{v^{vp}} \cong \\ &\cong \frac{\rho_{vp}(T_{cond}) r(T_{cond})}{T_{cond}}, \end{aligned} \quad (14)$$

where v^{vp} is the specific volume of the saturated vapour, m³/kg; v^L is the specific volume of the diethyl ether on the liquid–vapour coexistence line, m³/kg.

Substitute expression (10) in (8), and obtain the equation to calculate vapour quantity in the HP:

$$\begin{aligned} \frac{F(z)^2 r(T_{cond}) \rho_{vp}(T_{cond})}{\eta L} (T_{ev} - T_{cond}) &\cong \\ &\cong \frac{EN_A}{r(T_{cond}) \mu_{vp} n_{vp}(T_{ev})}. \end{aligned} \quad (15)$$

Vapour temperature over the evaporator's surface with low evaporation and without boiling is defined by the equation (16):

$$T_{ev} \cong T_{cond} \times \left(1 + \frac{EN_A \eta L}{\rho_{vp}(T_{cond}) F(z)^2 r(T_{ev})^2 \mu_{vp} n_{vp}(T_{ev})} \right) \leq T_B. \quad (16)$$

Steady-state evaporation conditions in HPs mean that the temperature in the evaporator does not exceed boiling temperature of the working fluid. Heating capacity of the HPs, W , is defined according to the following equation:

$$E \cong \frac{\rho_{vp}(T_{cond}) F(z)^2 r(T_{ev})^2 \mu_{vp} n_{vp}(T_{cond})}{N_A \eta L T_{cond}} \times (T_{ev} - T_{cond}) = K_{HP} \Delta T, \quad (17)$$

where $n_{vp}(T_{cond})$ is an average number of dry vapour molecules in the unit volume near the condenser, m⁻³.

Heat transfer coefficient K_{HP} at cross-section of the vapour channel of the HP is defined according to the following expression:

$$K_{HP} \cong \frac{\rho_{vp}(T_{cond}) F(z)^2 r(T_{ev})^2 \mu_{vp} n_{vp}(T_{cond})}{N_A \eta L T_{cond}}. \quad (18)$$

When the rate of heat supply into the thin evaporator is high, its average temperature is greater than the boiling temperature of the working fluid during bubble boiling or vaporization. The hydrodynamic vapour flow at the converging region of the nozzle has no time to carry out heating capacity generated through boiling in the evaporator.

Vapour density and pressure increase and boiling temperature of the working fluid goes up until it exceeds average temperature of the evaporator. Upon pressure increase the boiling in the evaporator stops (slows), and an overpressure wave spreads in the vapour channel to the condensation region of the HPs, where the vapour becomes supersaturated and condenses. The condensation process is not instant, and when the evaporator's activity is slowed (stopped), condensation lasts until the pressure decreases to the vapour saturation pressure at the condensation temperature, thereafter the condensation process stops.

The slow process of saturated vapour pressure decrease, due to condensation, feeds back through the vapour channel of the HP back to the evaporator, and the boiling process resumes there.

Pressure pulsations in the vapour channel of the HPs result from boiling and intensive vapour generation in the evaporator, non-instantaneous mass-transfer through the vapour channel to the condensation region of the HP, and the slow condensation process, which provides pressure decrease in the condensation region at first and then in the evaporator of the HPs.

Following all described processes the next pulsed evaporation cycle resumes. The heating capacity, entering to the flat grid evaporator of the short HP, when the evaporator's temperature exceeds the boiling temperature $T_B(P)$ of the working fluid, is defined according to the next equation:

$$E = \frac{[T_{ev} - T_B(P)] F(z)}{R_{ev}(T)}. \quad (19)$$

It is considered that moist vapour stream is formed of two subsystems: microdrops stream system G_{dr} and dry vapour stream system, G_{vp} . Rate of vaporization of the moist droplet vapour flow is defined in the standard way:

$$\dot{M} = G_{mix} = G_{vp} + G_{dr}. \quad (20)$$

For the purpose of simplification of the analytical model construction, the real droplet vapour flow over the evaporator, having microdrops dimensioned by complicated double-humped distribution function, Lee, Reges, Almenas, [16], is reported in terms of a mono-dispersal system of spherical microdrops with arithmetic middling

radius r_a , which is frequently used while analyzing two-phase droplet vapour flows:

$$r_a = \frac{1}{n_{dr}} \sum_{i=0}^{\infty} r_{dri} n_{dri}, \quad (21)$$

where n_{dr} is the total number of microdrops of all sizes per unit volume of the droplet vapour flow over the evaporator, $1/m^3$; n_{dri} is the number of microdrops of the diethyl ether with radius r_{dri} per unit volume of the droplet vapour medium, $1/m^3$.

Considering the accepted assumption over spherical shape of microdrops, the expression for absolute moisture γ of the droplet vapour flow is defined in the standard way:

$$\gamma = \frac{M_{dr}}{M_{dr} + M_{vp}} = \left[1 + \frac{\rho_{vp}}{\rho_{dr}} \left(\frac{3}{4\pi} \frac{1}{r_a^3 n_{dr}} - 1 \right) \right]^{-1}, \quad (22)$$

where M_{dr} is total mass of microdrops per unit volume of the droplet vapour flow over the evaporator, kg; M_{vp} is vapour mass per unit volume of the dry vapour flow over the evaporator, kg; n_{dr} is the total number of microdrops of all sizes per unit volume of the droplet vapour flow over the evaporator, $1/m^3$; n_{dri} is the total number of microdrops of all sizes per unit volume of the droplet vapour flow over the evaporator, $1/m^3$; ρ_{dr} is density of microdrops of the diethyl ether, kg/m^3 .

The density of moisture vapour $\rho_{vp}^{mix}(T_{ev})$ without taking into account the relative motion phases is:

$$\rho_{vp}^{mix}(T_{ev}) = \frac{\rho_{dr}\rho_{vp}}{\gamma\rho_{vp} + (1-\gamma)\rho_{dr}}. \quad (23)$$

Synergies between consumable and absolute mass concentrations of microdrops γ_G or consumable and absolute moisture levels are defined according to the following relation:

$$\gamma_G = \frac{\gamma\psi}{(1-\gamma) + \gamma\psi}; \quad \psi = \frac{u_{dr}}{u_{vp}}. \quad (24)$$

The value γ_G represents the relation between the quantity of the condensed droplet phase and the total quantity of the two-phase droplet vapour, and, considering the expression (22), is as follows:

$$\gamma_G = \left[1 + \frac{\rho_{vp}}{\rho_{dr}\psi} \left(\frac{3}{4\pi} \frac{1}{r_a^3 n_{dr}} - 1 \right) \right]^{-1} = \frac{G_{dr}}{G_{mix}}. \quad (25)$$

Mass flow rate of microdrops on the evaporator's surface is considered to be proportional to vaporization velocity and mass flow rate of the vapour:

$$G_{dr} \cong B \left(\frac{E}{r(T_{ev})} \right)^a \left(\frac{G_{vp}}{F} \right)^b, \quad (26)$$

where a and b are numerical coefficients; B is a coefficient with account for thermophysical properties of the diethyl ether and structural parameters of the evaporator (porosity, typical dimension of channels and pores).

To evaluate the vapour quantity transported from the evaporator to the condensation region of the HP, equation (31) is used, where the microdrops subsystem contribution to the generation of overpressure of the two-phase droplet mixture over the evaporator $P(T_{ev})$ in the vapour channel is neglected:

$$G_{mix} = G_{vp} + G_{dr} \cong \frac{\rho_{vp}^{mix} F(z) \Delta P_{vp}}{\eta_{mix} L}. \quad (27)$$

As a result of the boiling process in the evaporator, the pressure of the vapour over the evaporator increases up to P^* , whereby the boiling process in the surface layers and further in the whole of the thin evaporator (3 mm thick) is slowed (stopped) due to the fact that average temperature of the evaporator T_{ev} becomes lower than the boiling temperature T_B of the working fluid in the evaporator under the increased pressure and the confined space:

$$T_{ev} < T_B(P^*). \quad (28)$$

Furthermore, pulsing of the overpressured vapour begins to spread to the condensation region through the vapour channel. Cessation of boiling and retarding of vaporization in the evaporator of the HP lead to significant reduction (cessation) of the heat release and decrease in moist vapour transportation along the vapour channel of the HP to the condensation region of the HP. The time period $\Delta\tau_{ev}$ of pressure increase up to P^* and cessation of boiling in the capillary-porous evaporator is estimated in linear approximation in ideal gas state and laminar heat transfer inside of the vapour channel of the HP, according to the formula:

$$\begin{aligned} \Delta\tau_{ev} &\cong \frac{[P^* - P(T_{cond})] F(z) L}{k_B T_{ev} n_{vp}} \cong \\ &\cong \frac{[P^* - P(T_{cond})] F(z) L r(T_B) m_{vp}}{E k_B T_{ev}}. \end{aligned} \quad (29)$$

Surplus energy (increased pressure) release time $\Delta\tau_{HP}$ in the evaporating region, by means of vapour flow transfer to the condensation region of the HP, is estimated according to the following formula:

$$\Delta\tau_{HP} \cong \frac{E \Delta\tau_{ev}}{r(T_B) \rho_{vp}^{mix}(T_{ev}) u(T_{ev}) F(z)}. \quad (30)$$

Surplus pressure release time $\Delta\tau_{HP}$ partially determines the time value of oscillations of the vapour flow in the vapour channel of the HP, during which the vapour pressure pulse, arisen over the evaporator, reaches the HP condensation surface, and condenses partially. The time period $\Delta\tau_{cond}$ of pressure decrease up to $P(T_{cond})$ is estimated according to the formula:

$$\Delta\tau_{cond} \cong \frac{E \Delta\tau_{ev}}{r(T_{cond}) \rho_{vp}^{mix}(T_{cond}) u(T_{cond}) F(z)}. \quad (31)$$

As a result of the liquid phase formation, pressure near the cooling condensation surface reduces to:

$$P^* \cong P(T_{cond}). \quad (32)$$

This leads to the slowing of heat transfer through the vapour channel, the rarefaction wave propagation from the condensation zone to the evaporator and the start of the next cycle of pulsed increase of the pressure near the evaporator's surface. Thus, cycle pulse duration $\Delta\tau_0$ in the vapour channel of the HP is:

$$\Delta\tau_0 \cong \Delta\tau_{ev} + \Delta\tau_{HP} + \Delta\tau_{cond} + \Delta\tau_{sound}. \quad (33)$$

The analysis of the obtained measured data of heat transfer over the evaporator shows that the designed HPs

work in the boiling mode. This fact is confirmed by influence of operating parameters of the vaporization process (heat flow density q and pressure $P(T_{ev})$) on the heat transfer coefficient α . The influence of these parameters is related to the similar influence of heat flow density and pressure over the bubble boiling in the substantial volume. Performed numerical estimation of parts of pulsation duration $\Delta\tau_0$ from the expression (33) show the following.

Pressure increase duration $\Delta\tau_{ev}$ over the HPs evaporator leads to increased values $\Delta\tau_{ev} \sim 10^{-1}-10^{-2}$ c, which means incomplete adequateness of flat model of estimation of evaporability in the evaporator. It is necessary to consider nonequilibrium volumetric vaporization with regard to the structure and porosity of the evaporator, temperature and moisture gradient in the boiling two-phase working fluid.

Moving duration $\Delta\tau_{HP}$ of the vapour cluster along the convergent-divergent HPs vapour channel at vapour flow velocity in the channel equal $\sim 100-300$ m/s, reaches $\Delta\tau_{HP} \sim (4.8-1.6) \cdot 10^{-3}$ s, which is acceptable only in the case when sonic velocity in dry vapour is ~ 300 m/s and correspondingly large temperature gradients in the vapour channel.

Maximum duration of condensation period of moist vapour is also excessive and reaches $\Delta\tau_{cond} \sim 10^{-1}-10^{-2}$ s.

Duration of expansion wave motion from condensation region to the HP evaporator at sonic speed in moist vapour about 100 m/s does not exceed $\Delta\tau_{sound} \sim 1 \cdot 10^{-3}$ s.

Comparison of experimental measured results of pulsation period duration in the convergent-divergent vapour channel of short low temperature HPs $\Delta\tau_0 = (2-2.5) \cdot 10^{-3}$ s with the valued $\Delta\tau_0 \sim (0.75-1.5) \cdot 10^{-3}$ s obtained using numerical method and the software CFD Design 10.0 shows that they have good fit values.

Comparison of experimental measured results of pulsation period duration in the convergent-divergent vapour channel of short low temperature HPs $\Delta\tau_0 = (2-2.5) \cdot 10^{-3}$ with estimated values obtained using analytical method shows excessive values of analytical results. Suggested simple theoretical model of the flat surface evaporation gives excessive values of pulsation period duration and does not fully correspond to acutely nonequilibrium evaporation processes in the grid capillary porous evaporator with boiling working fluid.

Conclusions.

1. Heat transfer coefficient of the short linear HPs with the Laval-like vapour channel reaches the value of $(22 \pm 1) \cdot 10^3$ W/m²K; heat transfer coefficient of the HPs with the cylindrical vapour channel does not exceed $(15 \pm 1) \cdot 10^3$ W/m²K, if thickness of the capillary-porous insert layer is 3 mm, diameter is 20 mm and length is 100 mm. Comparison of heat transfer coefficients in short HPs shows sufficient advantages of HP with the Laval-like vapour channel in contrast with standard cylindrical channel.

2. The pulsatile flow regime in the vapour channel of short linear HPs occurs when the working fluid in the evaporator starts to boil. Vapour density and pressure increase and boiling temperature of the working fluid goes up until it exceeds average temperature of the evaporator. Upon pressure increase, the boiling in the evapora-

tor stops (slows), and an overpressure wave spreads in the convergent-divergent vapour channel to the condensation zone of the HPs, where the vapour becomes supersaturated, and condenses. Condensation of moist vapour results in pressure decrease in condensation region, and after arrival of the expansion wave at the HPs evaporator, pressure over the evaporator also decreases, the boiling process in the evaporator proceeds and the pulsation cycle in the vapour channel repeats.

3. Flow stagnation leads to vortex formation, and their interaction causes pulse-coupled vortex decay, static pressure boost and complex reverse flows. Calculation results show that flow stagnation during the pulsation cycle leads to an enlargement of the recirculating region and augmentation of condensation, and this effect is significant.

With all the operating parameters of heat pipes, two effects were observed: pulsating flow regime of two-phase vapour flow and film-type condensation.

References

1. Akachi H. Structure of Heat Pipe. US patent 1990. № 4921041.
2. Tong B. Y., Wong T. N., Ooi K. T. Closed-loop pulsating heat pipe. *Applied Thermal Engineering*. 2001, Vol. 21, No. 18, P. 1845–1862.
3. Naik R., Varadarajan V., Pundarika G., Narasimha K. R. Experimental Investigation and Performance Evaluation of a Closed Loop Pulsating Heat Pipe. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2013, Vol. 6, No. 2, P. 267–275.
4. Seryakov A. V. Velocity measurements in the vapour channel of low temperature range heat pipes. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2013, Vol. 2, No. 8, P. 1595–1603.
5. Gupta A. K., Lilley, D., Sayred N. Swirling flow. New York : Wiley. 1987. 588 p.
6. Seryakov A. V. Pulsation flow in the vapour channel of low temperature range heat pipes. *Direct Research Journal of Engineering and Information Technology*. 2014, Vol. 2(1), P. 1–10.
7. Seryakov A. V. Pulsation flow in the vapour channel of short low temperature range heat pipes. *International Journal on Heat and Mass Transfer Theory and Application*. 2014, Vol. 2, No. 2, P. 40–49.
8. Seryakov A. V., Ananiev V. I., Orlov A. V. Condensation research in the short low-temperature range heat pipes. *Proceedings of the 9th Minsk International Seminar of Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources*. Minsk, Belarus, 7–10 September 2015, Vol. 2, P. 168–176.
9. Seryakov A. V., Ananiev V. I. Condensation research in the short low-temperature range heat pipes. *Proceedings of the VIII International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer*. Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, September 15–18 2015. Begell House Inc. P. 693–696.
10. Patent № 2431101 RF, F 28D 15/00/ Method of filling heat pipes. Seryakov A.V. Published 10. 10. 2011. Bulletin No. 28.
11. Utility model patent No. 152108. Capacitance sensor for determination of a fluid layer thickness. Seryakov A. V. Published on 27.06.2015. Bulletin No. 18/2015.

12. Seryakov A. V., Konkin A. V., Belousov V. K. Application of a jet steam nozzle in medium-temperature range heat pipes. *Bulletin of Siberian State Aerospace University*. 2012, iss. 1(41), P. 142–147.

13. Faghri A. Heat Pipe Science and Technology. 1995. Washington USA, Taylor and Francis. 367 p.

14. Vargaftic N. B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoistvam gasov i zhidkostey* [Handbook of thermophysical properties of gases and liquids]. Moscow, Publishing house of Physico - Mathematical literature, 1963, 708 p.

15. Tables of physical values. Guide under the editorship of Kikoin I.K., the member of Academy of Science. Moscow : Atomizdat 1976. 1008 p.

16. Lee R., Reges J., Almenas K. Size and number density change of droplet populations above front during reflood. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1984, Vol. 27, No. 4, P. 573–585.

Библиографические ссылки

1. Pat. 4921041 US. Structure of Heat Pipe / Akachi H. 1990.

2. Tong B. Y., Wong T. N., Ooi K. T. Closed-loop pulsating heat pipe // *Applied Thermal Engineering*. 2001. Vol. 21, № 18. P. 1845–1862.

3. Experimental Investigation and Performance Evaluation of a Closed Loop Pulsating Heat Pipe / R. Naik [et al.] // *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2013. Vol. 6, № 2. P. 267–275.

4. Gupta A. K., Lilley D., Sayred N. Swirling flow. New York : Wiley, 1987. 588 p.

5. Seryakov A. V. Pulsation flow in the vapour channel of low temperature range heat pipes // *Direct Research Journal of Engineering and Information Technology*. 2014. Vol. 2(1). P. 1–10.

6. Seryakov A. V. Pulsation flow in the vapour channel of short low temperature range heat pipes // *International Journal on Heat and Mass Transfer Theory and Application*. 2014. Vol. 2, № 2. Pp. 40–49.

7. Seryakov A. V., Ananiev V. I., Orlov A. V. Condensation research in the short low-temperature range heat pipes // *Proceedings of the 9th Minsk International Seminar of Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources*. (7–10 September 2015, Minsk). Vol. 2. P. 168–176.

8. Seryakov A. V., Ananiev V. I. Condensation research in the short low-temperature range heat pipes // *Proceedings of the VIII Intern. Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer*. (15–18 September 2015, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina). Begell House Inc. P. 693–696.

9. Пат. 2431101 RF, F 28 D 15/00. Способ заполнения тепловых труб / Сeryakov A. B. Оpubл. 10.10.2011, Бюл. 28.

10. Полезная модель 152108. Емкостный датчик для определения толщины слоя жидкости / Сeryakov A. B. Оpubл. 27.06.2015, Бюл. № 18/2015.

11. Сeryakov A. B., Конькин А. В., Белоусов В. К. Применение струйного парового сопла в тепловых трубах среднетемпературного диапазона // *Вестник СибГУ*. 2012. Вып. 1(41). С. 142–147.

12. Seryakov A. V. Velocity measurements in the vapour channel of low temperature range heat pipes // *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2013. Vol. 2, № 8. P. 1595–1603.

13. Faghri A. Heat Pipe Science and Technology. Washington : Taylor and Francis, 1995.

14. Вapгaфтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М. : Физматгиз. 1963. 708 с.

15. Таблицы физических величин : справочник / под ред. акад. И. К. Кикоина. Атомиздат, 1976. 1008 с.

16. Lee R., Reges J., Almenas K. Size and number density change of droplet populations above front during reflood // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1984. Vol. 27, № 4. P. 573–585.

HARDWARE IMPLEMENTATION OF THE UNIT OF THE GNSS CONSUMERA. V. Sokolovskiy¹, E. A. Veisov¹, V. N. Ratushniak^{1*}, D. N. Rizhkov², S. V. Vysotsky²¹Siberian Federal University

79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

²JSC “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”

52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

*E-mail: oborona-81@ya.ru

Navigational equipment is currently used to solve a variety of tasks, such as providing civil and special aviation, navigating, surveying and mapping, Internet devices and unmanned vehicles performance. The level of technological development of digital signal processing devices at first glance removes the need for deep study of computational algorithms, but this is only at first glance. As a result of expanding the scope of navigation tools, there is a need to increase the working channels, increase the dynamic range of the processed signals, and also improve the reconfiguration capabilities of signal processing devices. Any synthesized computational algorithm that can be described in hardware description languages, such as VHDL and Verilog, consists of summation operations and a shift operation of the register. There are several basic architectures of adders, each of which has the advantage of either speed of operation or simplicity of implementation. The development of computational architectures working at frequencies of 100 - 200 MHz requires pipeline calculations. Despite the fact that the pipeline architecture has large overheads for equalizing the delays of the computational blocks, its use is justified when processing and converting signals while solving the navigation task.

The architecture of hardware computational blocks for constructing navigation equipment for the GLONASS / GPS consumer is considered in the article. The possible ways of increasing the efficiency of some architectures when implementing them on the basis of programmable gate arrays (FPGA) are given.

Keywords: pipeline, CORDIC, hardware adder, hardware multiplier.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 3. С. 604–608

АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АППАРАТУРЫ ПОТРЕБИТЕЛЯ ГНССА. В. Соколовский¹, Е. А. Вейсов¹, В. Н. Ратушняк^{1*}, Д. Н. Рыжков², С. В. Высоцкий²¹Сибирский федеральный университет

Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

²АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»

Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

*E-mail: oborona-81@ya.ru

Навигационное оборудование в настоящее время используется при решении множества задач, таких как обеспечение полётов гражданской и специальной авиации, судовождение, при проведении геодезических и картографических работ, в интернет-устройствах и беспилотных транспортных средствах. Уровень технического развития вычислительных устройств цифровой обработки сигналов, на первый взгляд, снимает необходимость глубокой проработки вычислительных алгоритмов, но это только на первый взгляд. Как результат расширения областей использования средств навигации появляется необходимость увеличения рабочих каналов, увеличения динамического диапазона обрабатываемых сигналов, а также улучшение возможностей реконфигурации устройств обработки сигналов. Любой синтезируемый вычислительный алгоритм, который можно описать на языках описания аппаратуры, таких как VHDL и Verilog, состоит из операций суммирования и операции сдвига регистра. Существуют несколько основных архитектур сумматоров, каждая из которых имеет преимущество либо по скорости работы, либо по простоте реализации. При разработке вычислительных архитектур, работающих на частотах 100–200 МГц, необходима конвейеризация вычислений. Несмотря на то, что конвейерная архитектура имеет большие накладные расходы на выравнивание задержек вычислительных блоков, её использование оправданно при обработке и преобразовании сигналов при решении навигационной задачи.

Рассмотрены архитектуры аппаратных вычислительных блоков для построения навигационной аппаратуры потребителя ГЛОНАСС/GPS. Приведены возможные пути повышения эффективности некоторых архитектур при реализации их на основе программируемых вентильных матриц (ПЛИС).

Ключевые слова: конвейер, CORDIC, аппаратный сумматор, аппаратный умножитель.

Introduction. The development of the hardware architecture of the digital processing of GLONASS/GPS signals is one of the priority directions of development of consumer navigation equipment. The computational costs of the implementation of algorithms for processing navigation signals as a result affect the cost of the device and also determine the future path of hardware development.

The processing of navigation signals at the intermediate frequency requires increased hardware costs due to the fact that computing units operating at frequencies above 100 MHz requires pipelining calculations, and the combined use of computational algorithms. After dropping the navigation signal processing frequency it is possible to reduce hardware costs through the use of a suitable architecture.

Adders architectures overview. Any synthesized computational algorithm, which can be described in hardware description languages such as VHDL and Verilog, consists of the sum and shift register operations. There are several major architectures of adders, each of which has the benefit of either the speed or ease of implementation [1–5].

The simplest architecture is the architecture of the adder, based on sequential bitmap summation of binary numbers and carry bit propagation from the least significant bit (LSB) to the most significant bit (MSB). The basic computational element of this architecture is called a full adder (FA). Despite its simplicity, the main drawback of this architecture is a linear dependence of the delay calculation on the amount of bit terms, as at each iteration of addition it is necessary to consider the carry bit propagation [6–8].

Another, the most demanded, architecture differs in that the propagation of carry bit is pre-calculated according to the so-called scheme of Manchester [9; 10]. The concepts of carry generation and carry transition are introduced in this architecture. Preliminary calculation (1) is carried out once for a group of bits. It reduces the amount of calculations for the following group of bits proportionally:

$$\begin{aligned} g_i &= X_i Y_i, p_i = X_i \bar{Y}_i + \bar{X}_i Y_i, \\ C_{i+1} &= g_i + p_i C_{in,i}, \\ C_{i+2} &= g_{i+1} + p_{i+1} g_i + p_{i+1} p_i C_{in,i}, \\ C_{i+n} &= g_{i+n-1} + \dots + p_{i+n-1} \dots p_{i+1} g_i + p_{i+n-1} \dots p_i C_{in,i}. \end{aligned} \quad (1)$$

In this architecture the speed of calculations depends on the length and composition of the terms of the bit sequence and depends on the length of the carry bit pre-calculation unit. For this architecture it has a value of a parameter logic circuits like fan-in. It is the number of inputs that can be connected to a circuit.

Another effective adder architecture is based on the simultaneous preliminary carry bit calculation to MSB bits for the group at $C_{in} = 0$ and $C_{in} = 1$, and then selecting the active unit based on the calculated value of C_{in} . In contrast to the architecture of a preliminary carry bit calculation to MSB, in this architecture, the calculation of transfer is possible to perform consistently in the elements of full adders. In this case, the sum bit sequences are possible in areas to which the input value of the carry bit has not reached yet. Thus it is possible to reduce the bit sequences calculation time in multiplies of the length of the selected transfer to MSB calculation interval.

There are combinations of bits in the bit string of terms that lead to the propagation of carry bit just for a group of bits. In this case, the calculation of carry bit transfer to MSB bit may be skipped [10; 11]. Then the sum of bit sequences in a limited range is calculated according to (2).

$$S_{i,i+n} = \begin{cases} p_i = X_i \bar{Y}_i + \bar{X}_i Y_i, \\ p_{i+n} p_{i+n-1} \dots p_i = 1, \\ 0, C_{in,i} = 0, \\ 1, C_{in,i} = 1. \end{cases} \quad (2)$$

For this architecture such factors as the probability of the emergence of groups of bits, that create transportation of the carry bit, are of great importance (fig. 1).

Usually, the best result is obtained by sharing multiple architectures. At the same time, organizing a pipelined calculation [10; 11], for such an option another important element of computing is introduced as a carry-save adder (CSA). This adder is based on the fact that the transfer to MSB is passed to the next iteration of the pipeline, that allows avoiding the transference computation in the current iteration, and allows you to work in parallel adder.

High throughput hardware design. There are several ways to improve the effectiveness of the described architectures (fig. 1). For the carry-lookahead adder one must use logic with a large fan-in. For the carry-select adder, ripple-carry adder and carry-skip adder one may iteratively use one and the same group of adders for different groups of bit sequences included in the terms [10; 11].

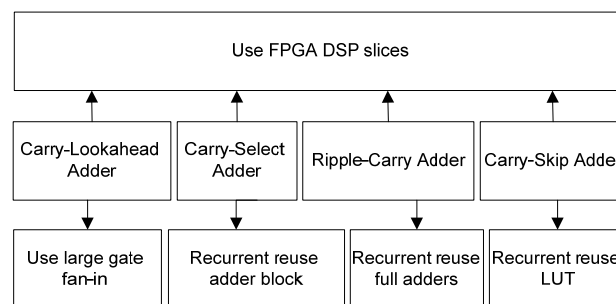


Fig. 1. The options of improving the efficiency of the architectures of adders

Рис. 1. Варианты повышения эффективности архитектур сумматоров

Hardware processing units operating at frequencies below 10 MHz are greatly simplified due to the choice of architecture adders, using the capabilities of FPGA chip more effectively.

In the development of computer architectures, operating at frequencies 100–200 MHz, pipelining calculations are necessary (fig. 2). Despite the fact that the pipelined architecture has a large overhead for alignment of delay of computing unit, its use is justified in such tasks as:

- 1) the encoding / decoding signals in real time;
- 2) decrease / increase in operating frequency of the signal;
- 3) the processing of wideband signals.

To build consumer navigation equipment GLONASS / GPS the following building blocks of digital processing are needed:

- 1) the scheme of frequency conversion;
- 2) the correlator of pseudo-random sequence;
- 3) the signal tracking scheme.

Frequency conversion scheme is realized based on the pipelined adder and pipelined multiplier (fig. 3). Pipelined multiplier is capable of operating at a frequency of

> 100 MHz and perform calculations for 1 clock cycle. Also in the GLONASS / GPS navigation consumer device the multiplier is used for the correlation processing of a navigation signal at the intermediate frequency. After down-frequency conversion the navigation signal may use frequency multipliers operating at frequencies less than 10 MHz (fig. 4). For such processing frequency extra hardware optimization and the use of asynchronous adders to construct a pipelined multipliers are possible (fig. 4). In addition, modern FPGA chips have a large number of DSP layers that can also be used to implement computational units. For example, the implementation of complex pipelined multiplier operating at a frequency of 100 MHz takes 25–30 thousands triggers. At the same time in current FPGA chips it will take only 3 DSP hardware layers. To build consumer navigation equipment GLONASS / GPS the following building blocks of digital processing are needed:

- 1) the scheme of frequency conversion;
- 2) the correlator of pseudo-random sequence;
- 3) the signal tracking scheme.

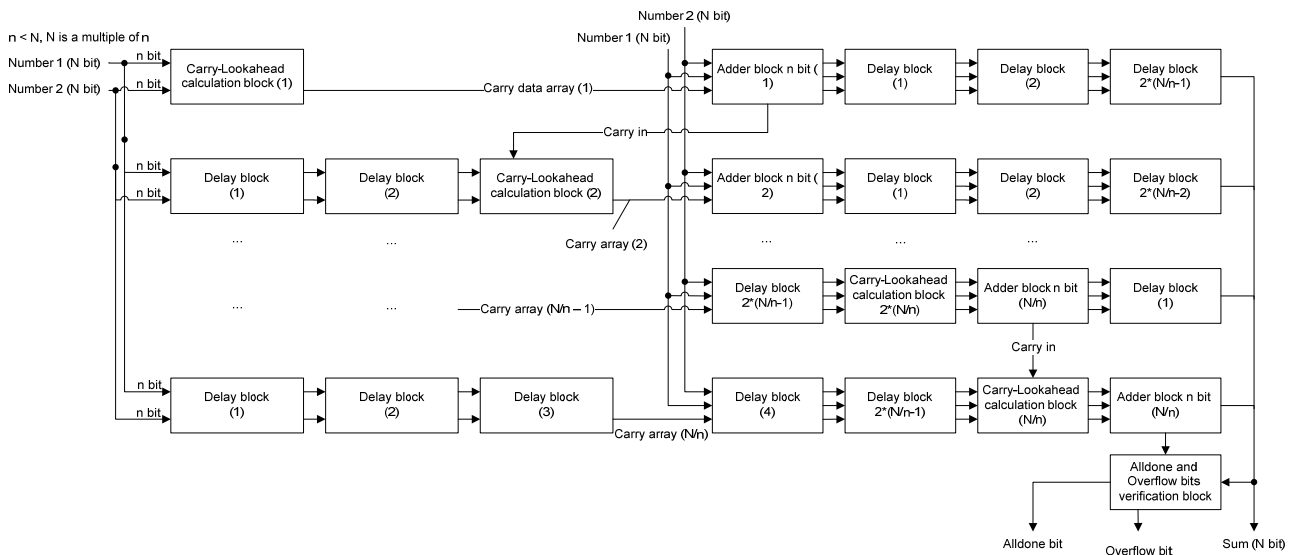


Fig. 2. Conveyor adder with preliminary transfer calculation

Рис. 2. Конвейерный сумматор с предварительным расчётом переноса

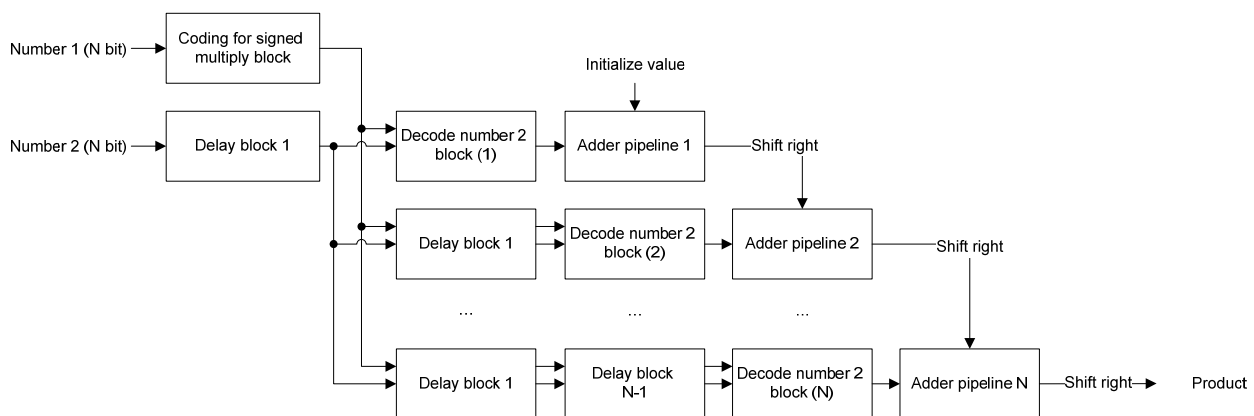


Fig. 3. Conveyor multiplier

Рис. 3. Конвейерный умножитель

Another important element of the GLONASS / GPS navigation consumer equipment is a digital generator of lettered frequencies (LFG). This oscillator is used to down-convert the carrier frequency of the navigation signal [12; 13].

The LFG can be implemented in two ways. In the first method LFG can be made based on parallel Flash-memory. This method is simple to implement and requires preservation of samples prior workers lettered frequencies. Among the shortcomings of this method one can distinguish that one frequency channel with a sampling frequency of 100–200 MHz requires one external chip Flash-memory. Also, with such a realization it is possible only operate at fixed frequencies with samples previously saved to Flash-memory.

Another method is based on the CORDIC processor operating in rotation mode (fig. 5). Pipelined CORDIC processor is identical to pipelined multiplier by hardware resources, at the same time it allows you to get just two harmonic components of SIN and COS signal [14; 15]. CORDIC processor operates according to the expressions:

$$\begin{aligned} x^{(i+1)} &= x^{(i)} - d_i y^{(i)} 2^{-i}, \\ y^{(i+1)} &= y^{(i)} + d_i x^{(i)} 2^{-i}, \\ z^{(i+1)} &= z^{(i)} - d_i \tan^{-1} 2^{-i}, \end{aligned} \quad (3)$$

where $x = \cos(z)$, $y = \sin(z)$, z – target angle, $d \in \{-1, 1\}$.

To accelerate the computation intermediate values $\tan^{-1} 2^{-i}$ are calculated beforehand and stored in registers. At each iteration, the intermediate value of angle is checked, then angle increment is selected in the next iteration of the pipeline.

Because this algorithm implements the pseudo-rotation, the length of the vector after the rotation is increased by a factor of $K = 1.64676$. To compensate for this effect, the initial length of the vector is chosen to be $1 / K = 0.60725$. Pipelined implementation allows to calculate the value of $\sin(z)$ and $\cos(z)$ in a single cycle, and it is capable of operating at a frequency of more than 100 MHz. The advantages of implementing LFG on CORDIC processor may include the possibility of dynamic reconfiguration of the operating frequency of the measuring path, providing performance for GLONASS / GPS signals in L1 or L2 bands. Also there is the ability to configure the LFG initial phase for hardware alignment signals paths. The disadvantage of this method is the high cost of hardware implementation, since there is a need to perform pipelining calculations at the block operating frequencies of 100–200 MHz. To implement this block not more than 10 DSP layer in FPGA are used, which can significantly reduce hardware costs.

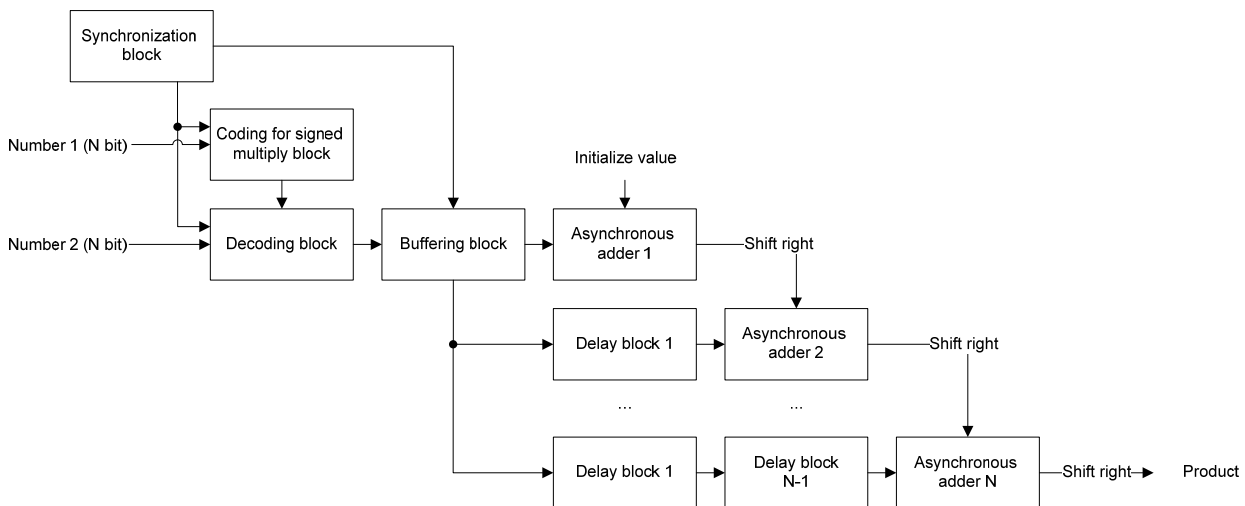


Fig. 4. Asynchronous conveyor multiplier

Рис. 4. Асинхронный конвейерный умножитель

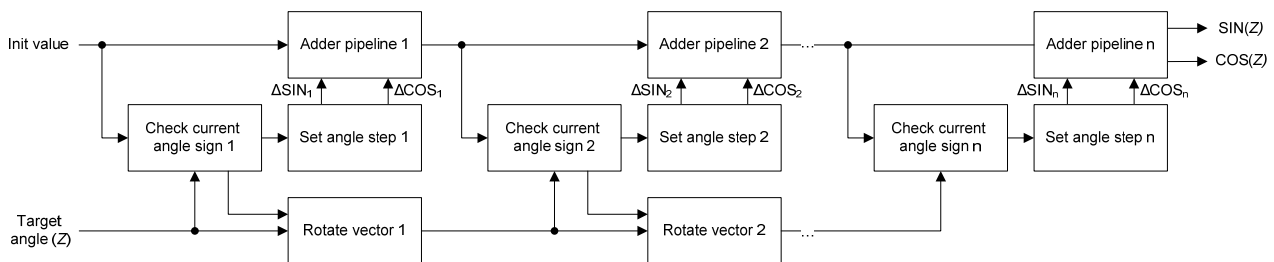


Fig. 5. Conveyor CORDIC processor

Рис. 5. Конвейерный CORDIC процессор (режим вращения)

Conclusion. The hardware architectures of computational units reviewed above have the property of determinism. This feature is of great importance in the construction of navigation consumer equipment GLONASS / GPS, because they allow taking into account the delay in the path of digital signal processing at the design stage. Despite the high price of pipelined performance of computing units, it makes possible to handle the navigation signals at a sampling frequency of 200 MHz. As the high sampling rate allows keeping the form of the navigation signal, it will eventually allow high-precision measurements of the phase of navigation signal. Collectively, the development of computing architectures will allow seeing the weaknesses of a computing device and make better use of the potential of modern FPGA devices.

Acknowledgments. This work was supported by the Ministry of Education and Science of Russian Federation № 02.G25.31.0202.

Благодарности. Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации № 02.G25.31.0202.

References

1. Sviridenko V. A. *Programmnye navigatsionnye priemniki: pervyy vykhod na potrebitel'skiy ryok*. [Software navigation receivers: first access to the consumer market]. MKA: VKC, 2010, No. 4, P. 61–64.
2. Grushvitskiy R. I., Mursaev A. X., Ugryumov E. P. *Proektirovanie sistem na mikroskhemakh programmiruemy logiki*. [Designing systems on programmable logic chips]. SPb., BKhV-Peterburg Publ., 2002. 608 p.
3. Prospekt firmy Falcom GmbH, 2015. Available at: <http://www.falcom.de/products>.
4. Prospekt firmy NTLab, 2015. Available at: <http://www.ntlab.com>.
5. Dr. Danny Rittman. *Strukturirovannaya konstruktsiya PLIS: novye napravleniya proektirovaniya PLIS i SnK*. [Structured ASIC design: a new design paradigm beyond ASIC, FPGA and SoC]. 2004.
6. Zhan M. Rabai, Ananta Chandrakasan, Borivozh Nikolich, *Tsifrovye integral'nye skhemy. Metodologiya proektirovaniya*. [Digital integrated circuits. Design methodology]. Moscow, 2007.
7. Mishin G. [Universal programmable analog integrated circuits: selection of elementary functional units]. *ELEKTRONIKA: Nauka, Tekhnologiya, Biznes*. 2004, No. 4. P. 26–30 (In Russ.).
8. Babakov V. N. [Navigation equipment today and tomorrow]. *Vestnik GLONASS*, 2011, No. 6, P. 33–35 (In Russ.).
9. Rutkevich A. V., Shishkin G. V., Steshenko V. B. [Experience in the development of SF-blocks and processor cores, ASIC type SoC for navigation equipment]. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES)*. 2010, No. 1, P. 237–240 (In Russ.).
10. Behrooz Parhami. *Komp'yuternaya arifmetika: algoritmy i konstruksii oborudovaniya*. [Computer arithmetic: algorithms and hardware designs]. 2000, 490 p.
11. Koren Israel. *Algoritmy komp'yuternoy arifmetiki*. [Computer arithmetic algorithms]. 2002, 281 p.
12. *Rukovodstvo po metodologii razrabotki vstroenogo dizayna UlatraFast*. [Xilinx UG1046. UlatraFast embedded Design Methodology Guide]. 2015, 231 p.
13. Perov A. I., Harisov V. N. *GLONASS printsipy postroeniya i funktsionirovaniya*. [GLONASS principles of construction and operation]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2010, 800 p.
14. D. Daineko. *Razrabotka algoritma CORDIC na osnove SBIS*. [FPGA based CORDIC algorithm design]. *Components & Technologies*. 2011, Vol. 12, P. 36–46 (In Russ.).
15. *1076 IEEE Standart VHDL Spravochnoe rukovodstvo*. [1076 IEEE Standard VHDL Langeage Reference Manual]. 2002, 300 p.

Библиографические ссылки

1. Свириденко В. А. Программные навигационные приёмники: первый выход на потребительский рынок // MKA: ВКС. 2010, № 4. С. 61–64.
2. Грушвицкий Р. И., Мурсаев А. Х., Угрюмов Е. П. Проектирование систем на микросхемах программируемой логики. СПб.: БХВ-Петербург, 2002. 608 с.: ил.
3. Проспект фирмы Falcom GmbH [Электронный ресурс]: официальный веб-сайт. 2015. URL: <http://www.falcom.de/products>.
4. Проспект фирмы NTLab [Электронный ресурс]: официальный веб-сайт. 2015. URL: <http://www.ntlab.com>.
5. Dr. Danny Rittman. Structured ASIC design: a new design paradigm beyond ASIC, FPGA and SoC. 2004.
6. Рабаи Ж. М., Чандракасан А., Николич Б. Цифровые интегральные схемы. Методология проектирования. пер. с англ. 2-е изд. М.: Вильямс, 2007.
7. Мишин Г. Универсальные аналоговые программируемые ИС: выбор элементарных функциональных узлов // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2004. № 4. С. 26–30.
8. Бабаков В. Н. Навигационная аппаратура сегодня и завтра // Вестник ГЛОНАСС. 2011. № 6. С. 33–35.
9. Руткевич А. В., Шишкин Г. В., Стешенко В. Б. Опыт разработки СФ-блоков и процессорных ядер СБИС типа SnK для навигационной аппаратуры // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoelektronных систем (МЭС). 2010. № 1. С. 237–240.
10. Parhami B. Computer arithmetic: algorithms and hardware designs. 2000. P. 490.
11. Israel K. Computer arithmetic algorithms. 2002. P. 281.
12. Xilinx UG1046, UlatraFast embedded Design Methodology Guide. 2015. P. 231.
13. Перов А. И., Харисов В. Н. ГЛОНАСС: принципы построения и функционирования. 4-е изд. перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.
14. Daineko D. FPGA based CORDIC algorithm design // Components & Technologies (Russia). 2011. Vol. 12. P. 36–46.
15. 1076 IEEE Standard VHDL Langeage Reference Manual. 2002. P. 300.

© Sokolovskiy A. V., Veisov E. A., Ratushniak V. N., Rzhkov D. N., Vysotsky S. V., 2017

SIMULATION MEANS OF ELECTROSTATIC DISCHARGES IN THE SYSTEM “STATIONARY PLASMA THRUSTER – TRANSFORMATION AND CONTROL SYSTEM”

D. A. Trofimchuk^{1*}, Y. A. Bezhayev², V. V. Ivanov¹, S. G. Kochura¹, I. A. Maximov¹

¹JSC “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”
52, Lenin Str., Jelesnogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

²National Research Tomsk Polytechnic University
30, Lenina Av., Tomsk, 634050, Russian Federation

*E-mail: trofden@mail.ru

The elements of construction of electric propulsion system of spacecraft (SC) correction can accumulate electrostatic charge due to interaction with the magnetospheric plasma. The impact of electrostatic discharges on the electrical circuit of the correction system can lead to failures of the transformation and control system (TCS).

Particular attention is currently being paid to solving the problems related to the impact of electrostatic discharges on electric circuits of the power conditioning units, designed for power supply and control electric propulsion thrusters of space craft correction. Due to the design of the propulsion subsystem thrusters it is impossible to solve the problem of electric charge impact on TCS electric circuits through shielding these circuits. Therefore the impact of electrostatic discharges on electric circuits from the propulsion subsystem thruster is considered to be one of the factors determining the reliability and failure-free operation of TCS and, consequently, of the overall spacecraft propulsion subsystem. This problem is important today due to the following: the widespread use of electric propulsion thrusters in GEO spacecraft correction systems, the implementation of new TCS design and technical solutions suitable for spacecraft unpressurized platforms, the implementation of new electronic component base.

The paper addresses the simulation means of electrostatic discharges occurring on the ceramics of the stationary plasma thruster and impacting TCS electric circuits, in particular the test equipment for generating high-voltage pulses, which allows replacing long-term and expensive tests performed on vacuum test benches. The paper contains the review of validation test results for TCS means of protection from electrostatic charge effects using high-voltage pulse generating (HVPG).

Keywords: spacecraft, magnetospheric plasma, transformation and control system, electrostatic discharge.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 3. С. 609–616

СРЕДСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ В СИСТЕМЕ «СТАЦИОНАРНЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ – СИСТЕМА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ»

Д. А. Трофимчук^{1*}, Ю. А. Бежаев², В. В. Иванов¹, С. Г. Кочура¹, И. А. Максимов¹

¹АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30

*E-mail: trofden@mail.ru

На элементах конструкции электрореактивных двигателей системы коррекции КА может накапливаться электростатический заряд вследствие взаимодействия с магнитосферной плазмой. Воздействие электростатических разрядов на электрические цепи системы коррекции может привести к отказам системы преобразования и управления (СПУ).

В настоящее время уделяется большое внимание решению проблем, связанных с воздействием электростатических разрядов на электрические цепи энергопреобразующего оборудования, предназначенного для питания и управления электрореактивными двигателями системы коррекции КА. В связи с конструктивными особенностями двигателей системы коррекции невозможно решить проблему воздействия электростатических разрядов на электрические цепи СПУ экранированием данных цепей, исходя из этого воздействие электростатических разрядов на электрические цепи со стороны двигателя системы коррекции рассматривается как один из факторов, определяющих надежность и безотказность СПУ и, соответственно, системы коррекции КА в целом. Актуальность темы обусловлена широким применением электрореактивных двигателей в системах коррекции геостационарных КА, переходом на новые конструктивно-технические решения,

используемые в СПУ, предназначенных для негерметичных платформ КА, применением новой электронной компонентной базы.

Представлены средства моделирования электростатических разрядов, возникающих на керамике стационарного плазменного двигателя, влияющие на электрические цепи СПУ, а именно, испытательное оборудование для генерации высоковольтных импульсов (ГВИ), которое позволяет заменить длительные и дорогостоящие испытания, проводимые на базе вакуумных стендов. Рассмотрены результаты проверки эффективности средств защиты СПУ от воздействия факторов электризации с использованием ГВИ.

Ключевые слова: космический аппарат, магнитосферная плазма, система преобразования и управления, электростатический разряд.

Introduction. During flight operation the spacecraft (SC) and its subsystems equipment are exposed to space factors (SP) [1; 2].

In the interaction of magnetospheric plasma (MP) with the construction materials of the outer surface of the SC, due to the complex geometry of the SC surface, the differences in light and electro physical parameters of various fragments of the surface, there is a differential charge distribution on the SC surfaces interacting with the surrounding plasma, and nonuniform volume charge of structural materials of surfaces [3–6].

One of the systems of the SC, which is exposed directly to the MP is the correction system (CS) [7]. The most important element of CS is the transformation and control system (TCS) which is electrically connected with a stationary plasma thruster (SPT), having in its composition the gas-discharge chamber (GDC). The ceramics used in the manufacture of GDC under the influence of MP accumulates a charge, and under certain conditions electrostatic discharges (ESD) occur. Stray currents of these discharges may penetrate into the electric circuit and have a negative impact (up to failure) on the performance of TCS and the CS as a whole [8].

Simulation of MP impact on the system SPT–TCS.

During geomagnetic disturbances the current density of

electrons may rise to a value of $1 \cdot 10^{-9} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ [1; 9]. Settling time of fixed charge in the irradiated ceramics used in the composition of GDC for engine SPT-100V in the modeling of charging under laboratory conditions ranges from 100 to 125 sec. [10]. In this case, the maximum possible electric charge accumulated on the inner surface of GDC engine SPT-100V with an area of 187 cm^2 is equal to $2 \cdot 10^{-5} \text{ C}$ [11]. In the case of ESD there is a probability that the stored charge “flows” through the circuit of the anode to the control circuit and power supply.

To confirm the efficiency of the system SPT–TCS under the impact of MP during normal operation, it is necessary to model space factors (SF) at the stage of experimental ground tests EGT [12]. On a special stand was simulated the impact of MP on the system SPT–TCS with the parameters presented in tab. 1.

In the result of simulated SP on the system SPT–TCS in the anode circuit of SPT were recorded interference pulses with negative polarity characteristic of the discharge event caused by the accumulation of negative potential on SPT ceramic, then resetting the charge in the anode circuit of the SPD. Fig. 1 shows the interference pulse with maximum amplitude of 2.7 kV, a rise time of 40 ns [11].

Table 1

Parameters of the simulated magnetospheric plasma

Impacts	Impact factors parameters
Electrons	$E_e = 70 \text{ keV}$, $J_e = 1 \cdot 10^{-9} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$
Vacuum	Oil-free pumping Residual pressure of not more than 10^{-6} Torr
SPT ceramic temperature	$-45 \text{ }^\circ\text{C}$

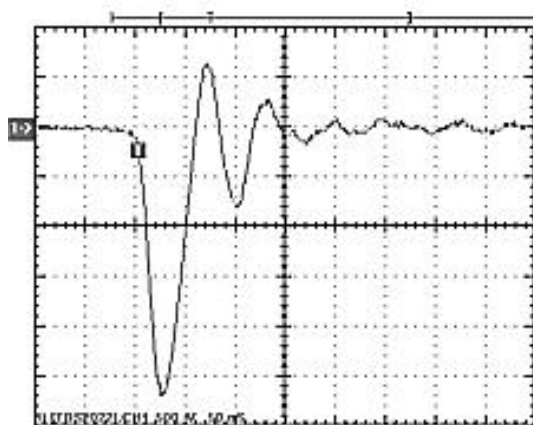


Fig. 1. Interference pulse in the anode circuit of SPT

Рис. 1. Помеховый импульс в цепи анода СПД

With the aim of developing and testing means of protection against the negative influence of electrostatics on the system SPT–TCS there is a need in experimental work on specialized installations that simulate the effects of magnetospheric plasma, which is very costly both in time and financial [13].

For optimization and minimization of financial and technical supports to conduct testing on the stage of the EGT protection system of SPT–TCS on the technical task of the JSC “ISS” Institute of nondestructive testing of Tomsk Polytechnic University have developed and manufactured test equipment for generating high voltage pulses (HVPG), which allows to simulate a direct injection gained in ceramics in an electric circuit of TCS [14; 15].

The discharge impulse of HVPG has a negative polarity. The impulse front is less than 10 ns. Voltage is adjustable between 3 to 9 kV. Reset charge is from $3 \cdot 10^{-6}$ to $3 \cdot 10^{-5}$ C. These characteristics of the discharge pulses correspond to the characteristics obtained by simulation of the impact of MP on the system SPT–TCS using specialized test benches [11; 13].

Technical characteristics of HVPG. The principle of the HVPG is based on generating a high voltage pulse with a negative polarity output voltage and a steep rise front [14]. A pulse is generated at the discharge of the capacitor to the switch. As the switch a hydrogen thyatron with a cold cathode with working gas (“thyatron”) of low pressure is used. The charge of the capacitor and the control of thyatron work are carried by means of electronic circuits, described below.

A structural scheme of HVPG is showed at fig. 2. The input supply voltage through the interference suppress filter (ISF) is supplied to high voltage transformer (HVT) and control system (SC). SC controls the operation of the HVT, the unit of heat generator hydrogen thyatron (UHG), a unit of preionization (UPI) and unit of ignition of the thyatron (UIT). The thyatron is located in the unit of impulse forming (UIF), there is also a replacement high voltage capacitor. The output signal from the UIF is made through a high-voltage cable with contact tip (CT).

Fig. 3. shows the UIF scheme. In the initial state, the capacitance C_0 is charged to voltage U_0 through the diode D_1 . When thyatron T_r works a negatively charged C_0 is discharged through R_H .

Pulse amplitude of the load voltage depends on C_0 and the value of the complex impedance of the load. Fig. 4, 5 show the form of the high-voltage pulse with $U_0 = 3$ kV, $C_0 = 1000$ pF and $U_0 = 9$ kV, $C_0 = 3300$ pF, respectively, taken from a low-inductive load $R_H = 50$ Ohm with a high voltage divider with $k_d = 1:1000$.

Changing the values U_0 and C_0 , it is possible to vary widely the amount of electric charge (Q_{charge}), passing through the load. Tab. 2 shows the values of Q_{charge} with different values of U_0 and C_0 .

The results of testing. With the help of HVPG experimental researches were conducted that formed the basis for the development and verification of the effectiveness of the protection means of the TCS from the influence of the electrostatic charge effect occurring on ceramic of engine SPT [16].

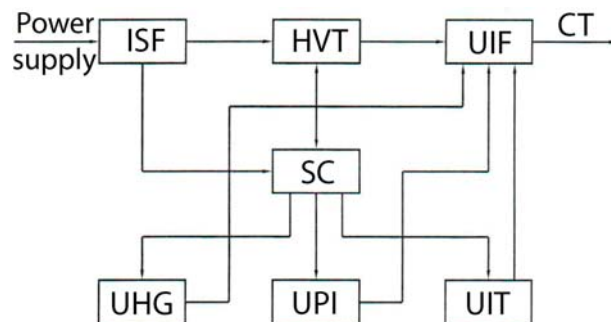


Fig. 2. Structural scheme of HVPG

Рис. 2. Структурная схема ГВИ

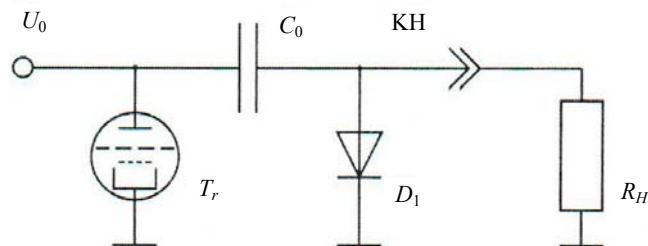


Fig. 3. UIF scheme

Рис. 3. Схема БФИ

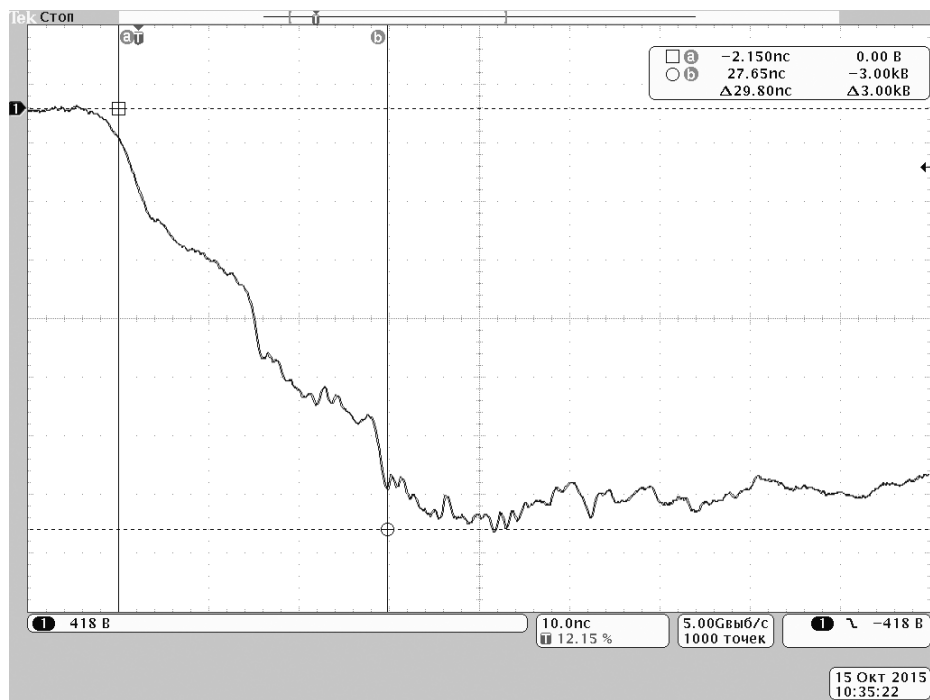
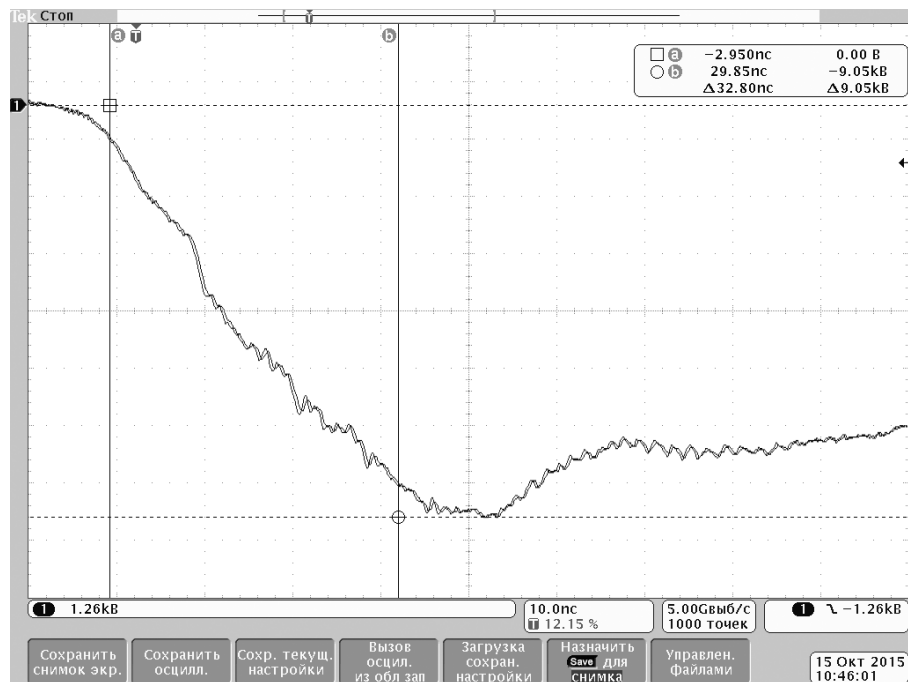
Fig. 4. High voltage pulse form within $U_0 = 3$ kV, $C_0 = 1000$ pFРис. 4. Форма высоковольтного импульса при $U_0 = 3$ кВ, $C_0 = 1000$ пФFig. 5. High voltage pulse form within $U_0 = 9$ kV, $C_0 = 3300$ pFРис. 5. Форма высоковольтного импульса при $U_0 = 9$ кВ, $C_0 = 3300$ пФ

Fig. 6. shows the results of testing. The validation of TCS security means was performed by applying to the input of the protection filter in the circuit of the anode of a series of high-voltage discharge impulses using a generator HVPG with the following characteristics of output voltage on the resistive load of 50 Ohms:

- pulse amplitude – minus 3 kV;
- pulse duration of 10^{-7} s;
- charge $3 \cdot 10^{-6}$ C;
- number of pulses – 20.

The oscillogram of the output pulse of HVPG on the 50 Ohm load is shown in fig. 7. The amplitude of the negative impulse – minus of 2.94 kV.

During the test, when exposed to a pulse from HVPG at the circuit of the anode to the input cable “Engine-TCS”, the parameters of the discharge pulses at the beginning of “Anode” line and the voltage in the anode circuit of TCS after the protection filter were under control. Measuring at the input circuit was carried out using a voltage divider 1000:1.

Fig. 8 shows the standard oscillogram of voltage in the anode circuit at the input cable "Engine-TCS".

Fig. 9 shows a typical voltage oscillogram in the anode circuit of high-voltage TCS after protection filter under influence on the circuit of the anode.

Due to the fact that the voltage pulse from the HVPG is fed to the unloaded circuit, the voltage at the beginning of the line and at the end (after the PF) is oscillatory and with the increased amplitude.

The results of measurements of HVPG impact on the circuit of the anode are given in tab. 3.

Conclusion. Developed HVPG allows simulating a direct injection of charge in the investigated electrical circuit. Discharge pulse of HVPG has characteristics that correspond to characteristics obtained by simulation of the impact of MP on the system SPT–TCS using specialized test benches. HVPG is put into operation at the JSC “ISS” and is used when conducting EGT BA. With the help of HVPG experiments on TCS resistance for space craft designed by JSC “ISS”, such as Yamal-400, Express-AM, Telkom etc.

The use of HVPG allows to confirm the effectiveness of the measures taken for the protection of the TCS from the negative impacts of MP on CS at the stage of experimental ground testing (EGT) with minimal time and financial investments.

Table 2

The values of the electric charge at different variable options of HVPG

C_0 , pF	U_0 , kV				
	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0
1 000	$3.00 \cdot 10^{-6}$ C	$4.50 \cdot 10^{-6}$ C	$6.00 \cdot 10^{-6}$ C	$7.50 \cdot 10^{-6}$ C	$9.00 \cdot 10^{-6}$ C
1 500	$4.50 \cdot 10^{-6}$ C	$6.75 \cdot 10^{-6}$ C	$9.00 \cdot 10^{-6}$ C	$1.13 \cdot 10^{-5}$ C	$1.35 \cdot 10^{-5}$ C
3 300	$9.90 \cdot 10^{-6}$ C	$1.49 \cdot 10^{-5}$ C	$1.98 \cdot 10^{-5}$ C	$2.48 \cdot 10^{-5}$ C	$2.97 \cdot 10^{-5}$ C

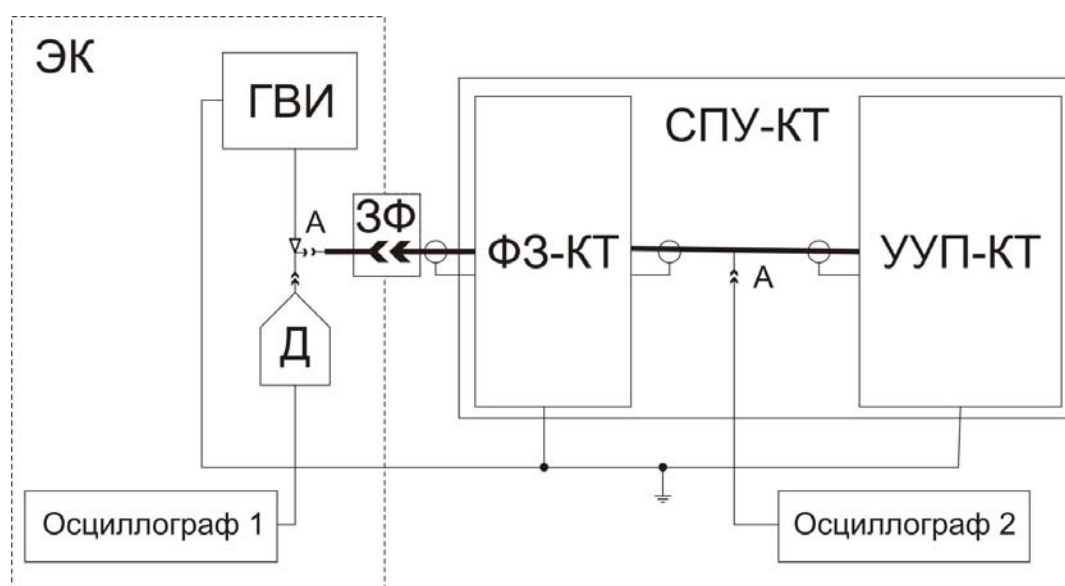


Fig. 6. Testing scheme of the protection means of TCS:

ГВИ (HVPG) – high-voltage pulses generator; СПУ-КТ (TCS-KT) – the layout of the system of power supply and control; ФЗ-КТ (PF-KT) – protection filter; УУП-КТ (CPSD) – control and power supply device; А – anode circuit; ЭК (SC) – screened chamber; ЗФ (BF) – bed filter; Д (D) – high-voltage divider

Рис. 6. Схема испытаний по проверке средств защиты СПУ:

ГВИ – генератор высоковольтных импульсов; СПУ-КТ – макет системы питания и управления; ФЗ-КТ – фильтр защиты; УУП-КТ – устройство управления и питания; А – цепь анода; ЭК – экранированная камера; ЗФ – засыпной фильтр; Д – высоковольтный делитель напряжения

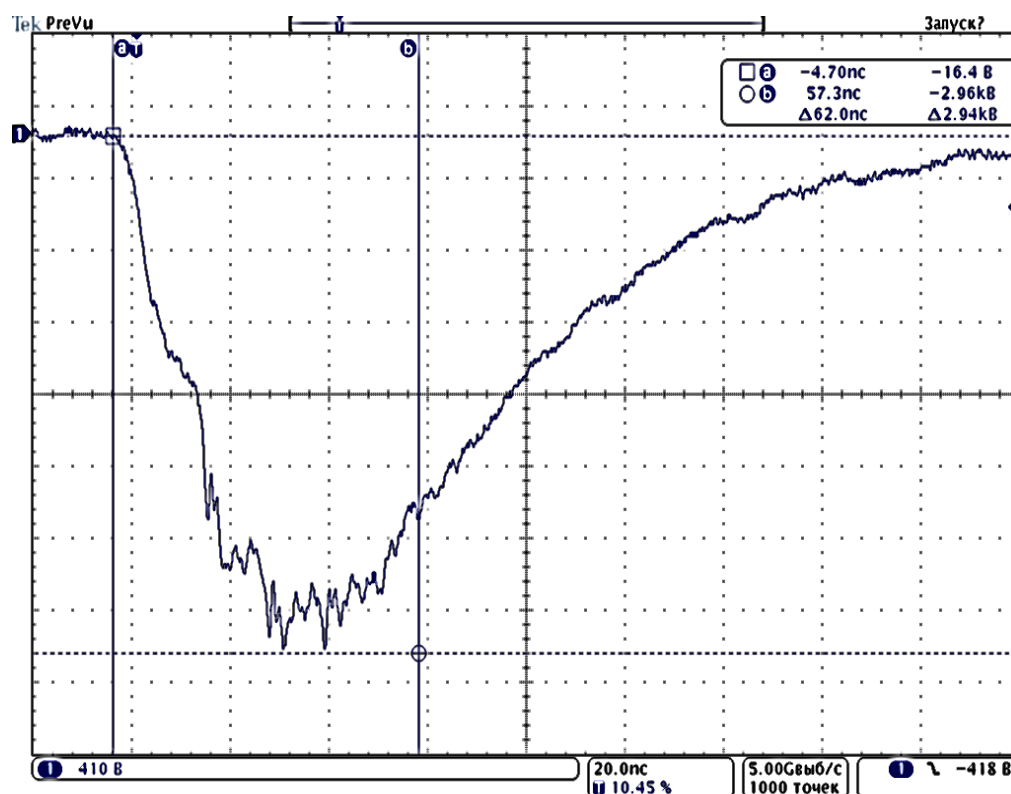


Fig. 7. Output pulse of HVPG on the 50 Ohm load

Рис. 7. Выходной импульс ГВИ на согласованной нагрузке 50 Ом

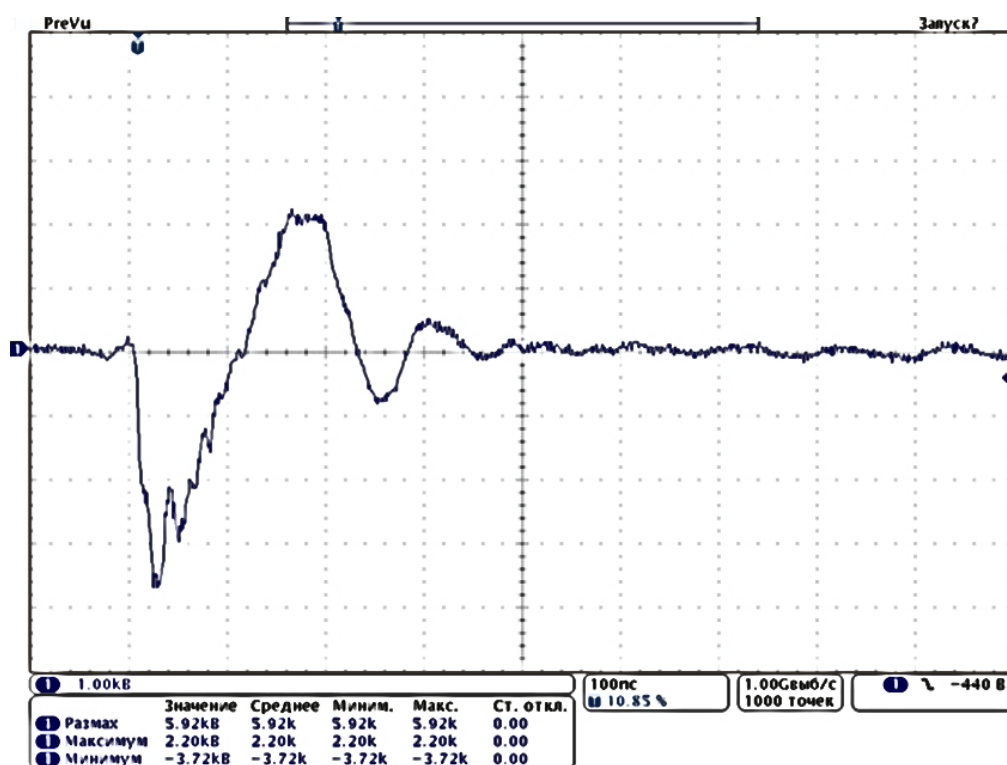


Fig. 8. Voltage at the beginning of the line in the anode circuit

Рис. 8. Напряжение в начале линии в цепи анода

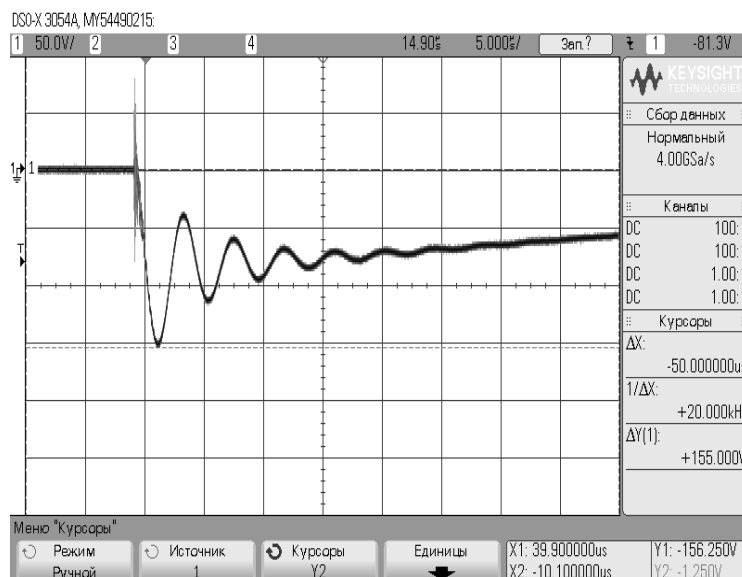


Fig. 9. The voltage in the anode circuit of the TCS layout after protection filter under the influence on the circuit of the anode

Рис. 9. Напряжение в цепи анода макета СПУ после фильтра защиты при воздействии в цепь анода

Table 3

The results of measurements

The voltage swing at the beginning of the line to the inlet of the cable "Engine-TCS", V	5920
The voltage swing at the outlet PF, V	236

References

1. Model' kosmosa. T. 2. Vozdeistvie kosmicheskoi sredy na materialy i oborudovanie kosmicheskikh apparatov [Space model. Vol. 2. Space environment influence on spacecraft materials and equipment]. Under the editorship of M. I. Panasuka, L. S. Novikova. Moscow, CDU Publ., 2007, 1144 p.
2. Horwitz J. L. Dynamics of Magnetospheric Plasmas. *Journal of spacecraft and rockets*. 1985, Vol. 22, No. 3, P. 225–230.
3. Maksimov I. A., Kochura S. G. *Issledovaniye vliyaniya faktorov kosmicheskogo prostranstva i tekhnogenykh faktorov na kosmicheskiye apparaty, razrabotka metodov i sredstv zashchity* [Research of influence of factors of space and technogenic factors on spacecrafts, development of methods and means of protection]. SibGAU. Publ., Krasnoyarsk, 2011, 182 p.
4. NASA-HDBK-4002A, Mitigating in-space charging effects – a guideline, 2011, NASA, 181 p.
5. Babkin G. V., Grafodatskiy O. S., Islyayev S. N. et al. *Osnovnyye pravila povysheniya bezopasnosti kosmicheskikh apparatov v usloviyakh radiatsionnoy elektrizatsii* [Ground rules of increase in safety of spacecrafts in the conditions of a radiation electrization]. A guide for designers. TSNIIMash, GONTI-1 Publ., 1990, 179 p.
6. Trofimchuk D. A., Tikhomirov R. E. et al. [Modelirovanie radiatsionnoy elektrizatsii konstruktsionnykh materialov kosmicheskikh apparatov]. *Trudy Vserossiyskoy konferentsii studencheskikh nauchno-issledovatel'skikh inkubatorov*. [Proceedings of the All-Russian conference of student research incubators]. Tomsk, 2014, 180 p.

7. Trofimchuk D. A., Yermoshkin Y. M., Kochev Y. V. et al. [Electrostatic discharge problem in geostationary spacecraft electrojet propulsion subsystem] *Aktual'nyye voprosy proyektirovaniya avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov dlya fundamental'nykh i prikladnykh nauchnykh issledovaniy* [Topical issues of projection of automatic spacecrafts for basic and applied scientific research]. Khimki, Publisher "NPO named after S. A. Lavochkin", 2015, P. 285–289 (In Russ.).
8. Trofimchuk D. A., Yermoshkin Y. M., Kochev Y. V. et al. [Electrostatic discharge problem in geostationary spacecraft electrojet propulsion subsystem]. *Vestnik SibGAU*. 2015, Vol. 16, No. 2, P. 404–410 (In Russ.).
9. Garret H. B. The geosynchronous plasma environment, AIAA Paper 90-0289, 1999, 16 p.
10. Zykov M. V., Bezhayev Y. A. et al. [The report on results of theoretical and pilot studies of static characteristic of ceramics of various brands under the influence of electrons with energies 70–100 kV and a current density 0,5–1 nA/cm², in temperature range plus 20 °C to minus 50 °C]. *Tekhnicheskii otchet OI-5-156/13*. [Technical Report]. Tomsk, INK TPU Publ., 2014, 14 p.
11. Zykov M. V., Bezhayev Y. A. et al. [The report by results of carrying out test experiments on a research of the interfering signals induced in electric circuits of the SPU at influence of electrons of magnetospheric plasma with energies 70–100 kV and a current density 0,5–1 nA/cm²]. *Tekhnicheskii otchet O2-5-156/13*. [Technical Report]. Tomsk, INK TPU Publ., 2014, 17 p.

12. Grafodatskiy O. S., Babkin G. V., Belinskiy V. N. et al. *Nazemnyye stendovyye ispytaniya kosmicheskikh apparatov na stoykost' k vozdeystviyu radiatsionnoy elektrizatsii* [Ground-based bench tests of space vehicles for resistance to radiation radiation]. A guide for designers. TSNIIMash, GONTI-1 Publ., 1992, 157 p.

13. Zykov M. V., Bezhayev Y. A. et al. [Problems of the calculated and experimental model operation of a radiation electrization of the digit camera of the high-pulse Hall engine of system of correction of the spacecraft]. *Radiatsionnaya stoykost' elektronnykh sistem – Stoykost'-2014* [Radiation resistance of electronic systems – Resistance 2014]. Moscow, 2014, P. 263–265 (In Russ.).

14. Zykov M. V., Bezhayev Y. A. et al. [Manufacture of the model of the generator for imitation of direct injection of the dumped digit charge in a feed circuit of the stationary plasma thrusters]. *Tekhnicheskii otchet* [Technical Report]. Tomsk, INK TPU Publ., 2013, 13 p.

15. Zykov M. V., Bezhayev Y. A. et al. [Experimental evaluation of the durability of the control unit of the Hall engine SPT-100 of the subsystem of correction to the effect of radiation electrification of outer space]. *Radiatsionnaya stoykost' elektronnykh sistem – Stoykost'-2014* [Radiation resistance of electronic systems – Resistance 2014]. Moscow, 2014, P. 261–263 (In Russ.).

16. Zykov M. V., Chigorko A. A. et al. [Development and the experimental working off of methods and means of protection of a control system of the high-pulse block of correction on the basis of the Hall engine for geostationary spacecrafts from electrostatic discharges]. *Tekhnicheskii otchet TO1-156/13-3-15*. [Technical Report]. Tomsk, INK TPU Publ., 2014, 45 p.

Библиографические ссылки

1. Модель космоса. В 2 т. Т. 2. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов / под ред. М. И. Панасюка, Л. С. Новикова. М. : КДУ, 2007. 1144 с.

2. Horwitz J. L. Dynamics of Magnetospheric Plasmas // *Journal of spacecraft and rockets*. 1985. Vol. 22, № 3. P. 225–230.

3. Максимов И. А., Кочура С. Г. Исследование влияния факторов космического пространства и техногенных факторов на космические аппараты, разработка методов и средств защиты : монография / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. 182 с.

4. NASA-HDBK-4002A, Mitigating in-space charging effects – a guideline. NASA, 2011, 181 p.

5. Основные правила повышения безопасности космических аппаратов в условиях радиационной электризации / Г. В. Бабкин [и др.] // Руководство для конструкторов / ЦНИИМаш. ГОНТИ-1, 1990. 179 с.

6. Моделирование радиационной электризации конструкционных материалов космических аппаратов / Д. А. Трофимчук [и др.] // Тр. Всерос. конф. студенческих науч.-исслед. инкубаторов (15–17 мая 2014, г. Томск) / под ред. В. В. Демина. Томск : Изд-во НТЛ, 2014. 180 с.

7. Проблема электростатических разрядов в электроактивной двигательной подсистеме геостационарного космического аппарата / Д. А. Трофимчук [и др.] // Актуальные вопросы проектирования автоматических космических аппаратов для фундаментальных и прикладных научных исследований / В. В. Ефанов. Химки : Изд-во ФГУП «НПО им. А. Лавочкина», 2015. С. 285–289.

8. Проблема электростатических разрядов в электроактивной двигательной подсистеме геостационарного космического аппарата / Д. А. Трофимчук [и др.] // Вестник СибГАУ. 2015. Т. 16, № 2. С. 404–410.

9. Garret H. B. The geosynchronous plasma environment, AIAA Paper 90-0289. 1999. 16 p.

10. Отчет по результатам теоретических и экспериментальных исследований электризуемости керамики различных марок под действием электронов с энергиями 70–100 кэВ и плотностью тока 0,5–1 нА/см², в диапазоне температур плюс 20 °С до минус 50 °С : техн. отчет / Зыков М. В., Бежаев Ю. А. и др. О1-5-156/13. Томск : ИНК ТПУ, 2014. 14 с.

11. Отчет по результатам проведения тестовых экспериментов по исследованию помеховых сигналов, наводимых в электрических цепях СПУ при воздействии электронов магнитосферной плазмы с энергиями 70–100 кэВ и плотностью тока 0,5–1 нА/см² : техн. отчет / Зыков М. В., Бежаев Ю. А. и др. // О2-5-156/13. Томск : ИНК ТПУ, 2014. 17 с.

12. Наземные стендовые испытания космических аппаратов на стойкость к воздействию радиационной электризации / О. С. Графодатский [и др.] // Руководство для конструкторов / ЦНИИМаш. ГОНТИ-1, 1992. 157 с.

13. Проблемы расчетно-экспериментального моделирования радиационной электризации разрядной камеры высокоимпульсного холловского двигателя системы коррекции космического аппарата / Ю. А. Бежаев [и др.] // Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2014 : науч.-техн. сб. тезисов докладов. М. : Изд-во ФГУП «НИИП», 2014. С. 263–265.

14. Изготовление макета генератора для имитации прямой инжекции сброшенного разрядного заряда в схему питания стационарного плазменного двигателя : техн. отчет / Зыков М. В., Бежаев Ю. А. и др. // Томск : ИНК ТПУ, 2013. 13 с.

15. Экспериментальная оценка стойкости блока управления холловским двигателем СПД-100 подсистемы коррекции к воздействию радиационной электризации космического пространства / Ю. А. Бежаев [и др.] // Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2014 : науч.-техн. сб. тезисов докладов. М. : Изд-во ФГУП «НИИП», 2014. С. 261–263.

16. Разработка и экспериментальная отработка методов и средств защиты системы управления высокоимпульсного блока коррекции на базе холловского двигателя для геостационарных космических аппаратов от электростатических разрядов : техн. отчет / Зыков М. В., Чигорко А. А. и др. // ТО1-156/13-3-15. Томск : ИНК ТПУ, 2014. 45 с.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТОПОЛОГИЙ НАГРУЗОЧНЫХ УСТРОЙСТВ С ДВОЙНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ
ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

А. С. Федченко*, Е. А. Мизрах, Д. К. Лобанов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: alek.fedchenko@gmail.com

Исследованы возможные топологии нагрузочных устройств, имеющих в своём составе непрерывный регулирующий элемент и импульсный преобразователь. При разработке и испытаниях систем электропитания космических аппаратов возникает потребность в устройствах, имитирующих различные электрические характеристики полезной нагрузки. Эта задача решается с использованием специализированных нагрузочных устройств, которые позволяют обеспечивать требуемую точность воспроизведения статических и динамических характеристик имитируемой нагрузки. Кроме того, существует возможность посредством нагрузочных устройств производить рекуперацию избыточной электроэнергии в питающую сеть переменного или постоянного тока, что, в свою очередь, позволяет повысить качество испытаний систем электропитания. Разработка устройства, позволяющего одновременно обеспечивать и заданную точность воспроизведения электрических характеристик полезной нагрузки, и рекуперацию избыточной электроэнергии, сопряжена с рядом технических сложностей, которые могут быть решены путём использования нагрузочного устройства, которое имеет в своём составе два управляемых стабилизатора: быстродействующий непрерывный регулятор и импульсный преобразователь, ограничивающий рассеиваемую мощность непрерывного регулятора и позволяющий обеспечить рекуперацию в питающую сеть.

Рассмотрены различные свойства топологий нагрузочных устройств с двойным регулированием, выделены наиболее перспективные топологии для использования в качестве нагрузочных устройств для испытания систем электропитания космических аппаратов. Разработано математическое описание нагрузочного устройства, используемого в составе испытательного комплекса, проведён анализ адмиттансно-частотных характеристик и качества подавления пульсаций для различных топологий. Рассмотрены аспекты работы нагрузочных устройств, связанные с режимом наведения помех по входному току, определены параметры, определяющие полосу наводимых частот различных топологий при равных условиях, определены условия возможности наведения помех заданной величины в четырёх топологиях.

Ключевые слова: нагрузочное устройство, проведение испытаний, системы управления, электронное оборудование, системы электропитания.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 3, P. 617–627

**STUDY OF DUAL CONTROL ELECTRONIC LOADS
FOR SPACECRAFT ELECTRICAL POWER SYSTEM TESTS**

A. S. Fedchenko*, E. A. Mizrah, D. K. Lobanov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: alek.fedchenko@gmail.com

In the article the possible topologies of electronic loads consisting of linear regulator and switched-mode converter are studied. During developing and testing of spacecraft power supply systems, there is a need for devices that simulate various electrical characteristics of the spacecraft payload. This problem can be solved using specialized electronic loads that allow reproducing static and dynamic characteristics of the simulated payload with required accuracy. In addition, using electronic loads it is possible to return unused electrical energy into a DC or AC power supply network, which, in turn, makes it possible to improve the quality of power supply system tests. The development of a device that simultaneously provides both specified accuracy of reproduction of payload electrical characteristics and the recovery of surplus electric power is associated with a number of technical difficulties that can be solved by using an electronic load that includes two controllable stabilizers: a high-speed linear regulator and a switched-mode converter which limits the dissipated power of the linear regulator and provides recovering an excess electrical energy to the supply network.

Various properties of dual control electronic load topologies were considered, the most promising topologies that can be used as electronic loads for spacecraft power systems tests were highlighted. A mathematical description of the electronic load used in the test setup was developed, an analysis of the admittances and the quality of noise suppression for various topologies was performed. The aspects of the electronic load operation related to the input current interfering mode, the parameters determining the frequency range of the interfered noise, and the conditions for the possibility of the interference were determined for four topologies under the same conditions.

Keywords: *electronic load, testing, control systems, electronic equipment, power supply systems.*

Введение. Важной составляющей процесса разработки космического аппарата (КА) является этап проведения испытаний систем электропитания (СЭП). Электрические испытания СЭП КА, в ходе которых определяется соответствие разработанной СЭП заявленным требованиям, проводятся с использованием специализированных нагрузочных устройств (НУ), имитирующих статические и динамические электрические характеристики полезной нагрузки. Такие НУ используются для решения широкого спектра задач, возникающих при испытаниях СЭП [1–6], в связи с чем при проектировании НУ выделяется ряд технических требований, среди которых:

- а) обеспечение работы устройства в заданных диапазонах изменения входных напряжения и тока;
- б) воспроизведение нескольких видов вольт-амперных характеристик (ВАХ) имитируемых нагрузок;
- в) обеспечение требуемой погрешности воспроизведения ВАХ имитируемых нагрузок;
- г) наведение гармонических и импульсных помех в заданной полосе частот;
- д) обеспечение рекуперации при заданном коэффициенте использования энергии.

Выполнение всех предъявленных к проектируемому НУ требований может стать трудноосуществимой задачей, особенно при необходимости обеспечения высокого быстродействия и мощности рассеяния порядка нескольких кВт [7–14]. Одним из возможных решений является использование НУ с двойным регулированием, имеющих в своём составе два регулирующих элемента и позволяющих совмещать в себе хорошие динамические характеристики НРЭ и возможность организации рекуперации посредством ИП, что ведёт также к улучшению массогабаритных характеристик НУ [15–17].

Топологии нагрузочных устройств с двойным регулированием. Основная идея НУ с двойным регулированием заключается в том, что стабилизацию непосредственно входного тока осуществляет НРЭ, в то время как ИП ограничивает мощность, рассеиваемую на НРЭ. При этом реализация НУ с двойным регулированием возможна по двум схемам соединения НРЭ и ИП: параллельной и последовательной. В параллельной схеме стабилизация мощности НРЭ достигается посредством ограничения тока, протекающего через НРЭ, в последовательной схеме – посредством ограничения падения напряжения на НРЭ. Иначе говоря, ИП в параллельной схеме выполняет функцию стабилизатора тока, а в последовательной – стабилизатора напряжения. Для организации требуемых контуров управления параллельные схемы должны содержать два датчика тока (по одному на НРЭ и ИП), последовательные – один датчик тока (ДТ) и один датчик напряжения (ДН). Для возможности имитации различных видов ВАХ (стабилизации постоян-

ной мощности и/или постоянного сопротивления) в обе схемы необходимо также добавить датчик входного напряжения. Принимая во внимание, что в параллельной схеме имеется три возможных места размещения датчиков тока, а в последовательной – два, возможно восемь различных топологий НУ с двойным регулированием (рис. 1).

Уставки, выдаваемые устройством управления (УУ) на НРЭ и ИП, определяются контурами управления, которые эти устройства образуют с соответствующими датчиками тока. На рис. 1 для уставок используются следующие обозначения: $I_{вх}$ – требуемый входной ток НУ, $I_{нрз}$ – требуемый ток НРЭ, $I_{нрзМАХ}$ – предельно допустимый ток НРЭ, $I_{ип}$ – требуемый ток ИП, $V_{нрз}$ – требуемое напряжение НРЭ, $V_{ип}$ – требуемое напряжение ИП. Распределение токов между НРЭ и ИП осуществляет УУ в соответствии с заранее определённым алгоритмом.

Топологии на рис. 1, а–е представляют собой схемы с параллельным соединением НРЭ и ИП. Общей особенностью этих топологий является то, что в них возможна стабилизация различных величин тока независимо на НРЭ и ИП. Общим недостатком этих топологий является то, что амплитуда наводимых пульсаций ограничена величиной тока, протекающего через НРЭ, который при больших напряжениях испытываемой СЭП может составлять лишь малую долю общего стабилизируемого тока.

Топологии на рис. 1, ж, з представляют собой схемы с последовательным соединением НРЭ и ИП. Общей особенностью этих топологий является то, что через НРЭ и ИП протекает общий ток, который стабилизируется быстродействующим НРЭ, что позволяет подавлять помехи по входному току эффективнее, чем в параллельных топологиях. Общим недостатком этих топологий является относительно низкая живучесть, поскольку при аварии НРЭ или ИП возможно создание аварийной ситуации. Кроме того, работоспособность последовательных схем зависит от индуктивности источника и проводов (подробнее этот вопрос будет рассмотрен ниже).

Во всех топологиях сигналы с датчиков тока и напряжений поступают на сумматоры и УУ, которое также может исполнять роль устройства защиты. На УУ, в частности, поступают те сигналы с ДТ, которые позволяют определить величину входного тока НУ, на основе которого УУ формирует сигналы управления для НРЭ и ИП. Так, в топологиях «а» и «е» на УУ подаются сигналы с обоих ДТ, что усложняет структуру УУ (требуется дополнительный канал). С другой стороны, в топологиях «б»–«д» и «ж», «з» УУ получает информацию о величине тока только в одном из элементов НУ (НРЭ или ИП), что создаёт дополнительные сложности в случае, когда УУ выполняет также и роль устройства защиты.

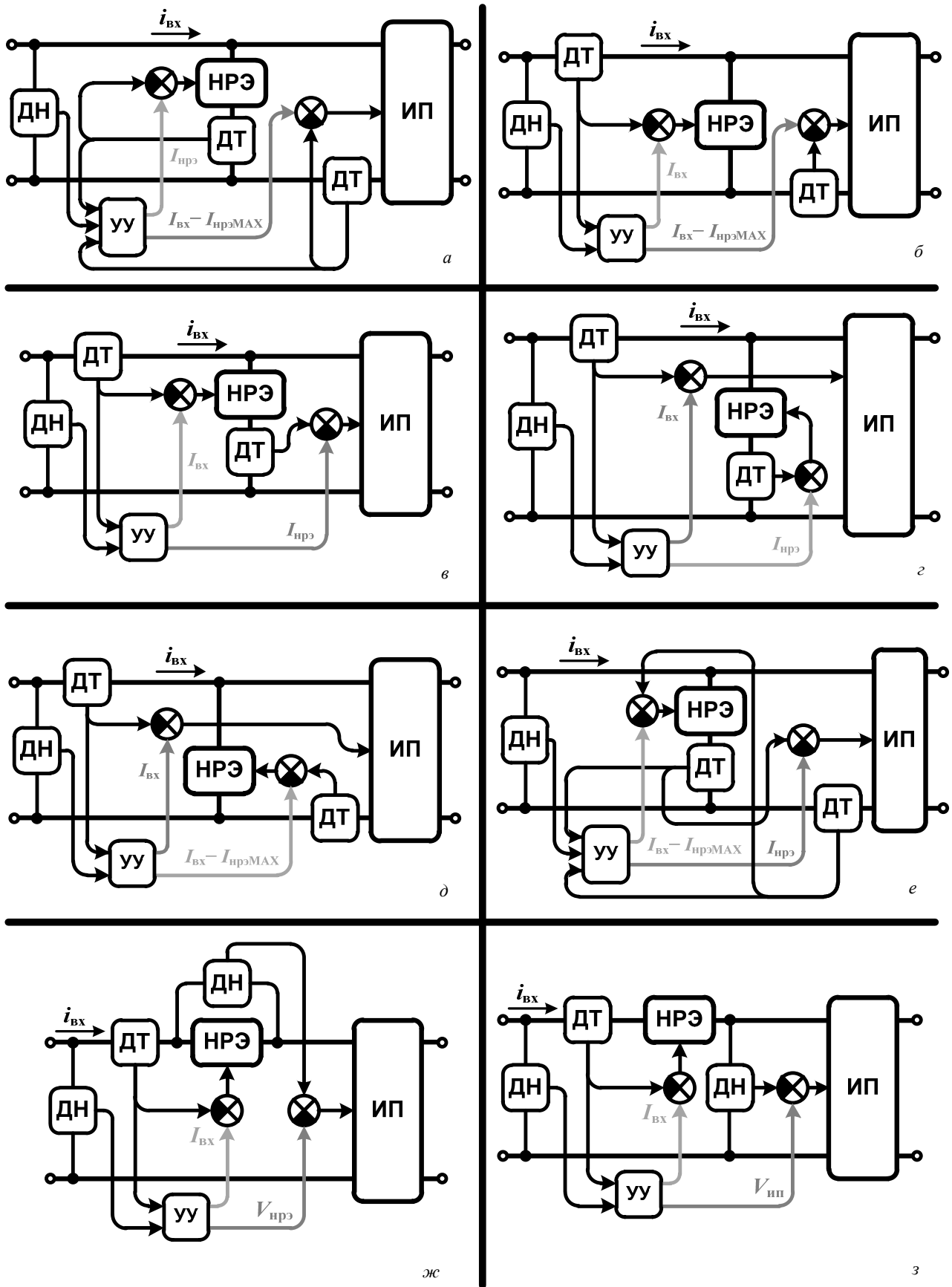


Рис. 1. Возможные топологии нагрузочных устройств с двойным регулированием:
a–e – схемы с параллельным соединением НРЭ и ИП; *ж, з* – схемы с последовательным соединением НРЭ и ИП

Fig. 1. Possible E-load topologies with double regulation

Свойства отдельных топологий

Свойства	«а»	«б»	«в»	«г»	«д»	«е»	«ж»	«з»
Повышенная живучесть	+	+		+				
Независимое наведение помех на НРЭ/ИП	+		+				+	
Широкая полоса пропускания	+	+	+				+	
Независимость разработки НРЭ и ИП	+	+		+				
Фильтрация входного тока		+	+				+	+
Контроль величины входного тока НУ		+	+	+	+		+	+
Диагностика НРЭ и ИП	+					+		
Быстрое ступенчатое увеличение входного тока	+	+	+	+	+	+		
Быстрое ступенчатое уменьшение входного тока							+	+

Для определения наиболее перспективных топологий была проведена сравнительная оценка (см. таблицу) по следующим критериям:

- повышенная живучесть: при выходе из строя НРЭ есть возможность продолжения работы за счёт ИП;
- независимое наведение помех на НРЭ/ИП: возможность наведения гармонических управляющих сигналов как на НРЭ, так и на ИП, что даёт возможность организовать схему наведения помех с минимальными гармоническими искажениями на частоте, близкой к частоте среза ИП;
- широкая полоса пропускания: возможность наведения помех по входному току посредством быстродействующего НРЭ в широкой полосе частот;
- более экономичные ДТ: возможность использования ДТ с лучшими характеристиками, поскольку через этот ДТ протекает меньшая часть общего тока;
- независимость разработки НРЭ и ИП: возможность разработки и испытания ИП и/или НРЭ независимо друг от друга;
- фильтрация входного тока: НРЭ фильтрует помехи и пульсации по входному току, в том числе помехи, создаваемые ИП;
- контроль величины входного тока: в схеме присутствует датчик непосредственно стабилизируемой величины – общего входного тока, что повышает точность стабилизации;
- диагностика НРЭ и ИП: ввиду наличия у НРЭ и ИП отдельных датчиков, существует возможность реализации в УУ функции диагностики работоспособности НРЭ и ИП без введения в схему дополнительных элементов;
- быстрое ступенчатое увеличение тока: в параллельных топологиях «а»–«е» (см. рис. 1) ток увеличивается с тем быстродействием, которое обеспечивает быстродействующий НРЭ (при уменьшении тока на большое значение НРЭ полностью закрывается, и ток будет уменьшаться с быстродействием ИП);
- быстрое ступенчатое уменьшение тока: в последовательных топологиях «ж», «з» (см. рис. 1) ток уменьшается с тем быстродействием, которое обеспечивает быстродействующий НРЭ (при увеличении тока на большое значение НРЭ полностью откроется, и ток будет увеличиваться с быстродействием ИП).

На основе приведённых выше положительных и отрицательных качеств каждой топологии был сделан вывод, что топологии «а»–«в» и «ж» представляют наибольший интерес для дальнейшего рассмотрения.

Математическое описание. На рис. 2 представлена схема замещения устройств, совместно с которыми работает НУ при проведении испытаний СЭП КА, которые описываются следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} v_{\text{вх}} = e_{\text{сэп}} - i_{\text{вх}} Z_{\text{сэп}}, \\ i_{\text{рек}} = (v_{\text{инввых}} - e_{\text{вс}}) Y_{\text{вс}}, \end{cases} \quad (1)$$

где $v_{\text{вх}}$ – входное напряжение НУ; $e_{\text{сэп}}$ – ЭДС СЭП; $i_{\text{вх}}$ – входной ток НУ; $Z_{\text{сэп}}$ – внутренний импеданс СЭП; $i_{\text{рек}}$ – ток рекуперации (выходной ток НУ); $v_{\text{инввых}}$ – выходное напряжение НУ; $e_{\text{вс}}$ – ЭДС внешней сети (сети, в которую производится рекуперация); $Y_{\text{вс}}$ – адмиттанс внешней сети.

Устройство управления в общем случае описывается нелинейными зависимостями напряжений управления НРЭ $v_{\text{упрНРЭ}}$ и ИП $v_{\text{упрИП}}$ от напряжения датчика входного напряжения $v_{\text{дн}}$. В дальнейшем эти зависимости будут обозначены как $f(K_{\text{дн}} v_{\text{вх}})$ для НРЭ и $g(K_{\text{дн}} v_{\text{вх}})$ для ИП, где $K_{\text{дн}}$ – коэффициент усиления датчика напряжения.

На основе функциональных связей, представленных на рис. 1, можно составить системы уравнений, описывающие отношения между токами и напряжениями в схемах.

Топология «а» описывается системой

$$\begin{cases} v_{\text{упрНРЭ}} = f(K_{\text{дн}} v_{\text{нрз}}) - i_{\text{нрз}} K_{\text{дт1}}, \\ v_{\text{упрИП}} = g(K_{\text{дн}} v_{\text{нрз}}) - i_{\text{ип}} K_{\text{дт2}}, \\ i_{\text{вх}} = i_{\text{нрз}} + i_{\text{ип}}, \end{cases} \quad (2)$$

где $K_{\text{дт1}}$ и $K_{\text{дт2}}$ – коэффициенты усиления датчиков тока ДТ1 и ДТ2; $i_{\text{нрз}}$ и $i_{\text{ип}}$ – токи, протекающие через НРЭ и ИП соответственно.

Топология «б» описывается системой

$$\begin{cases} v_{\text{упрНРЭ}} = f(K_{\text{дн}} v_{\text{нрз}}) - i_{\text{вх}} K_{\text{дт1}}, \\ v_{\text{упрИП}} = g(K_{\text{дн}} v_{\text{нрз}}) - i_{\text{ип}} K_{\text{дт2}}, \\ i_{\text{вх}} = i_{\text{нрз}} + i_{\text{ип}}. \end{cases} \quad (3)$$

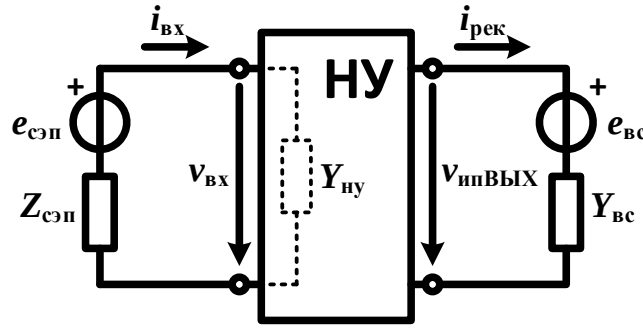


Рис. 2. НУ в составе испытательной установки

Fig. 2. E-load as part of a testing setup

Топология «в» описывается системой

$$\begin{cases} v_{упрНРЭ} = f(K_{дн} v_{нрз}) - i_{вх} K_{дт1}, \\ v_{упрИП} = i_{нрз} K_{дт2} - g(K_{дн} v_{нрз}), \\ i_{вх} = i_{нрз} + i_{ип}. \end{cases} \quad (4)$$

Топология «ж» описывается системой:

$$\begin{cases} v_{упрНРЭ} = f(K_{дн} v_{нрз}) - i_{вх} K_{дт}, \\ v_{упрИП} = v_{нрз} K_{дн} - g(K_{дн} v_{нрз}), \\ v_{вх} = v_{нрз} + v_{ип}. \end{cases} \quad (5)$$

На основе систем (1)–(5) были составлены функциональные схемы, представленные на рис. 3.

Описание блока НРЭ может быть получено как аналитическим путём (на основе системы уравнений, описывающих структуру и элементы НРЭ), так и путём идентификации опытного образца НРЭ (рис. 4). На рис. 4, а представлена внутренняя структура НРЭ на основе модели в два входа и одним выходом, в которой $W_{yc1}(s)$ – передаточная функция (ПФ) корректирующего устройства (КУ) НРЭ; V_n – напряжение смещения управляющего перехода; $X_1, U_1 = [v_{нрз} \ v_{упр}]^T$, $Y_1 = [i_{нрз}]$ – векторы состояния, управления и выхода НРЭ соответственно; A_1, B_1, C_1, D_1 – матрицы коэффициентов идентифицированной модели НРЭ. Схема использованной в работе идентифицированной MISO-модели представлена на рис. 4, б.

Идентификация модели ИП в составе блока ИП (рис. 5) сопряжена со сложностями, связанными с импульсным характером работы ИП (рис. 5, а). В случаях, когда частота среза ИП значительно ниже его частоты переключения, ИП возможно представить в виде непрерывной линейной модели [18]. Ввиду того, что к ИП в составе НУ не предъявляются требования по быстродействию, использование непрерывной линейной модели ИП является обоснованным. Помимо ММО-модели в состав блока ИП также входят $W_{yc2}(s)$ – ПФ КУ ИП и $K_{шим} = 1/V_{пил}$ – коэффициент широтно-импульсной модуляции, где $V_{пил}$ – напряжение пилообразного сигнала ШИМ.

В качестве ИП возможно использовать любой импульсный регулятор, удовлетворяющий требованиям, предъявляемым к устройству. В частности, для защиты испытываемой аппаратуры к ИП предъявляется

требование обеспечения гальванической развязки входных и выходных клемм, что может быть реализовано посредством мостовых преобразователей на основе повышающей и понижающей схем (рис. 5). В связи с тем, что на входе ИП необходимо поддерживать ток постоянной величины, на входе ИП необходимо расположить фильтр, который будет сглаживать пульсации по току (катушка индуктивности) или напряжению (конденсатор).

Стоит отметить, что в понижающей схеме (рис. 5, в, г) при стабилизации входных токов большой величины значительными становятся импульсные токи, протекающие через входную ёмкость $C_{вх}$. Эти токи могут привести к нагреву входного конденсатора и, как следствие, выходу из строя ИП. Таким образом, в параллельных топологиях «а»–«в» более предпочтительным является использование преобразователей на основе импульсных регуляторов повышающего типа (рис. 5, а, б), которые описываются системой нелинейных уравнений:

$$\begin{cases} L \frac{di_{ип}}{dt} = v_{ипВХ} - \frac{2}{n} v_{ипВЫХ} \cdot (1-d), \\ C \frac{dv_{ипВХ}}{dt} = \frac{2}{n} i_{ип} \cdot (1-d) - i_{рек}, \end{cases} \quad (6)$$

где $i_{ип}$ – входной ток ИП; $v_{ипВХ}$ – входное напряжение ИП; $v_{ипВЫХ}$ – выходное напряжение ИП; d – коэффициент заполнения; $i_{рек}$ – выходной ток (ток рекуперации); $n = N_2/N_1$ – коэффициент трансформации (N_1 и N_2 – количество витков на первичной и вторичной обмотках соответственно); L – индуктивность дросселя; C – ёмкость конденсатора.

В последовательной топологии «ж» изменение величины входного тока НУ приводит к изменению величины падения напряжения на НРЭ, при этом скорость этого изменения значительно превышает ту скорость, которую способен скомпенсировать ИП, поскольку при наведении помех высокой частоты амплитуда тока ограничивается активными и индуктивными составляющими импеданса соединительных проводов и входного импеданса ИП. С целью увеличения амплитуды наводимых помех необходимо снизить значение входного импеданса ИП на высокой частоте, что можно достичь увеличением ёмкости входного конденсатора ИП.

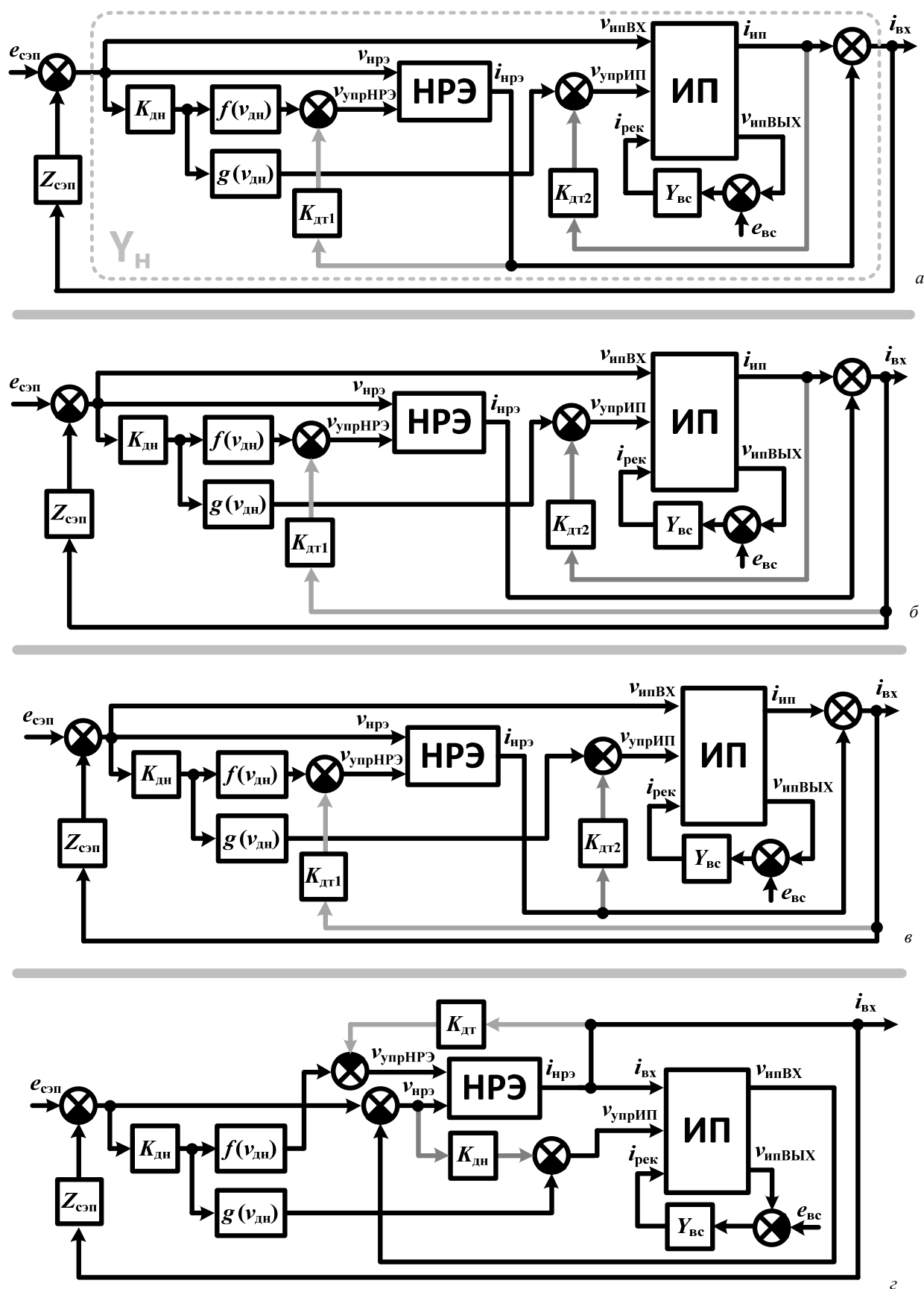


Рис. 3. Обобщенные функциональные схемы рассматриваемых топологий:
а – схема топологии «а»; *б* – схема топологии «б»; *в* – схема топологии «в»; *г* – схема топологий «ж»

Fig. 3. Generalized block diagrams of considered topologies

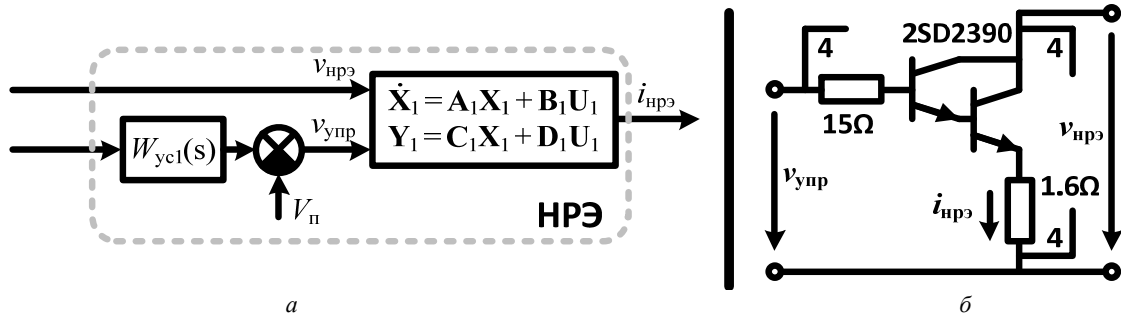


Рис. 4. Исследованная модель НРЭ: а – функциональная схема; б – электрическая схема

Fig. 4. Examined linear regulator model: a – block diagram, b – electrical circuit

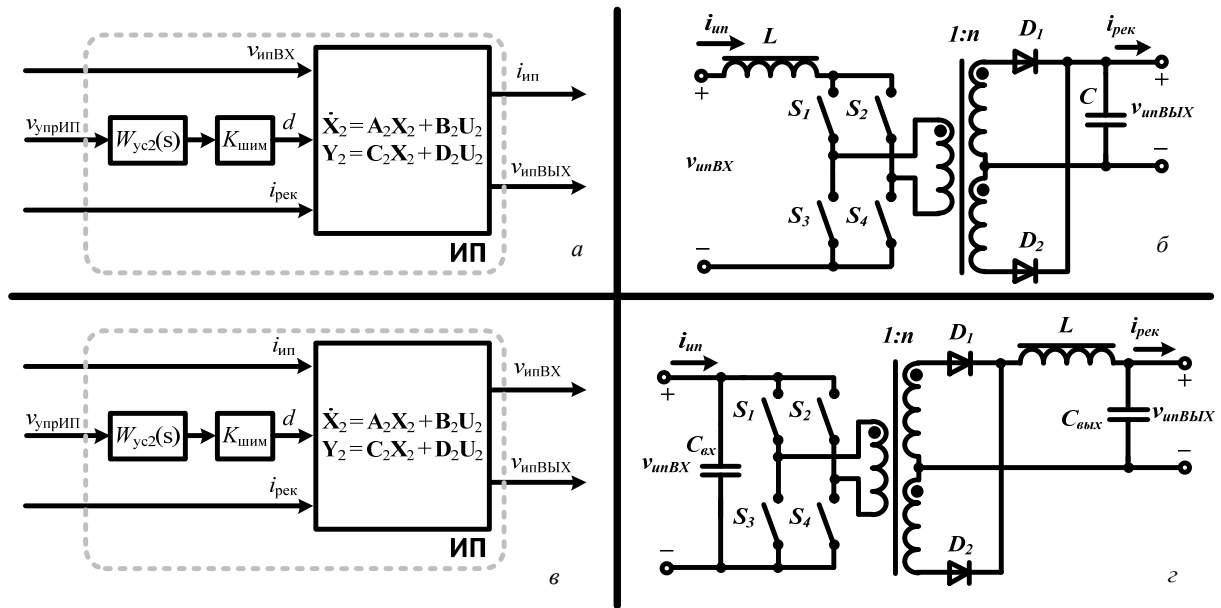


Рис. 5. Исследованные модели ИП: а – функциональная схема, б – электрическая схема мостового преобразователя повышающего типа; в, г – схема мостового преобразователя понижающего типа

Fig. 5. Examined switched-mode converter models: a – block diagram and b – circuit of boost-based full-bridge converter, c and d – of buck-based full-bridge converter

Таким образом, в последовательной топологии «ж» рекомендуется использовать мостовые преобразователи на основе импульсных регуляторов понижающего типа (рис. 5, в и г), которые описываются системой нелинейных уравнений

$$\begin{cases} C_{\text{вх}} \frac{dv_{\text{инВХ}}}{dt} = i_{\text{ин}} - 2 \cdot n \cdot i_L \cdot d, \\ L \frac{di_L}{dt} = 2 \cdot n \cdot v_{\text{инВХ}} \cdot d - v_{\text{инВЫХ}}, \\ C_{\text{вых}} \frac{dv_{\text{инВЫХ}}}{dt} = i_L - i_{\text{рек}}, \end{cases} \quad (7)$$

где $C_{\text{вх}}$ и $C_{\text{вых}}$ – емкости входного и выходного конденсатора; i_L – ток дросселя.

Для дальнейшего исследования было разработано четыре НУ топологий «а»–«в» и «ж», каждое из которых удовлетворяет следующим требованиям:

- входной ток: 10 А;
- средняя мощность, рассеиваемая на НРЭ: 100 Вт;

- наибольшая погрешность стабилизации входного тока: 0,1 А;
- наибольший размах пульсаций по входному току: 0,1 А;
- полоса пропускания: не менее 100 кГц.

Адмиттансные частотные характеристики. Одним из условий для обеспечения устойчивости является выполнение неравенства $Z_{\text{сэп}} Y_{\text{н}} < 1$, где $Z_{\text{сэп}}$ – импеданс источника напряжения (СЭП), $Y_{\text{н}} = I_{\text{вх}}/V_{\text{вх}}$ – входной адмиттанс источника тока (НУ) (см. рис. 3, а) [19]. Для источника тока наилучшей является ситуация, при которой проводимость во всём диапазоне частот равна нулю.

Из графиков адмиттансных частотных характеристик (рис. 6) можно сделать вывод, что параллельные топологии «б» и «в» обладают приблизительно равным входным адмиттансом практически на всём диапазоне частот, в то время как топология «а» имеет в области низких частот на порядок большую величину адмиттанса. Топология «ж» обладает наилучшим

с точки зрения источника тока адмиттансом, который на низких частотах составляет лишь десятые доли мкСм.

Наведение помех. Передаточные функции замкнутых контуров по управлению определяются как $W(s) = I_{\text{вх}}(s)/V_{\text{оп}}(s)$ (рис. 7), при этом в схемах «а» и «б» $V_{\text{оп}}(s)$ является опорным напряжением обоих контуров НРЭ и ИП, в схемах «в» и «г» – только контура НРЭ.

В топологии «а» имеется спад, начинающийся в области 10 кГц, который обусловлен частотой среза ИП. В топологии «б», в отличие от топологии «в», отсутствует ярко выраженный резонансный пик, что позволяет наводить без искажений тестовые сигналы, имеющие более сложный гармонический состав.

Несмотря на то, что в последовательной топологии «ж» полоса пропускания сравнима с полосой пропускания параллельных топологий «б» и «в», наведение

пульсаций в топологии «ж» сопряжено с большими сложностями, чем в параллельных топологиях. Поскольку в последовательной схеме в качестве ИП рекомендовано использовать преобразователь с большой входной ёмкостью, в эквивалентной схеме (рис. 8) ИП может быть заменён источником постоянного напряжения $E_{\text{ип}}$, подразумевая, что быстродействия ИП достаточно для поддержания напряжения НРЭ на требуемом уровне на низких частотах. Источник постоянного напряжения $E_{\text{сэл}}$ замещает СЭП, индуктивность $L_{\text{к}}$ замещает выходную индуктивность испытываемой СЭП и кабельную линию, соединяющую СЭП и НУ. Схема замещения НРЭ состоит из двух элементов: источник постоянного тока $i_{\text{ну}}$ и активное сопротивление НРЭ $R_{\text{нрэ}}$.

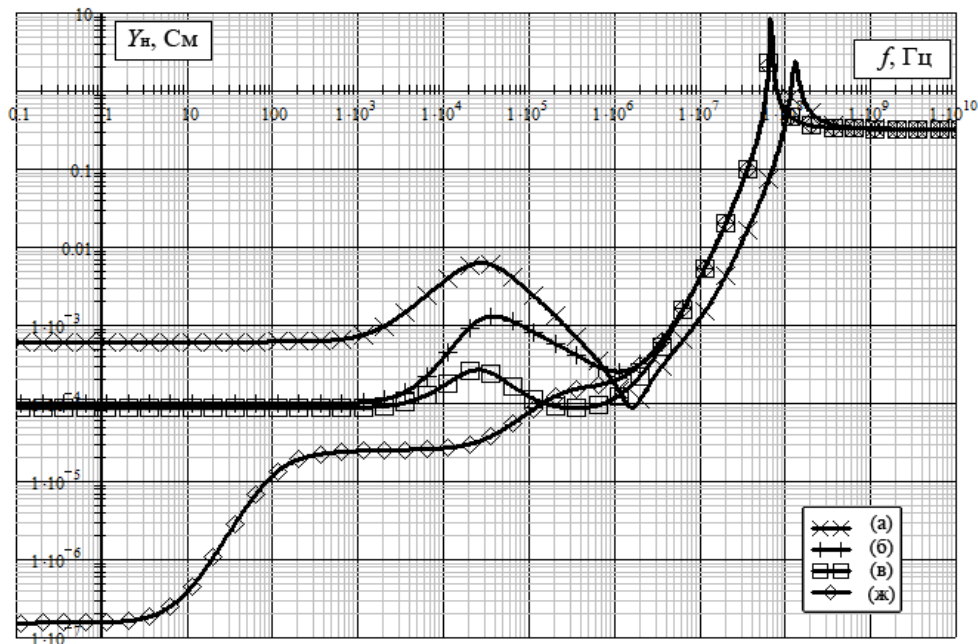


Рис. 6. Адмиттансные частотные характеристики рассматриваемых топологий

Fig. 6. Admittance response of examined topologies

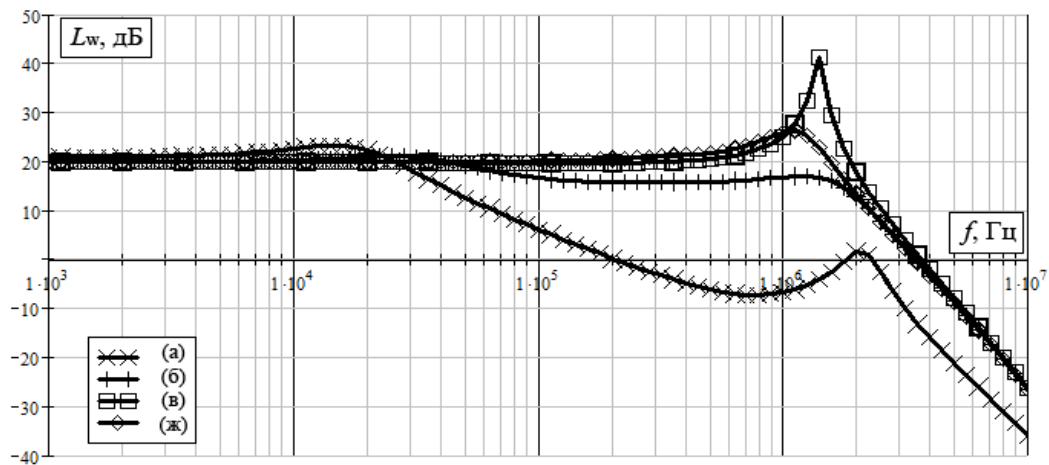


Рис. 7. Передаточные функции замкнутых контуров рассматриваемых топологий

Fig. 7. Closed loop transfer functions of examined topologies

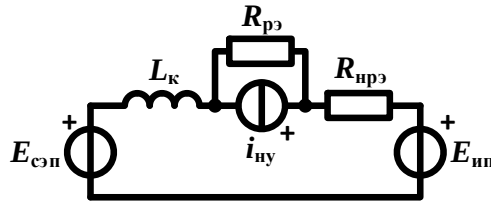


Рис. 8. Эквивалентная схема НУ с испытуемым СЭП и кабельной линией

Fig. 8. Equivalent circuit of E-load with tested power supply system and cable line

При наведении пульсаций изменение тока через индуктивность L_k будет приводить к появлению напряжения на индуктивности v_{Lk} , мгновенное значение которого определяется как

$$v_{Lk} = L_k \frac{di_{\text{ну}}}{dt} = L_k \omega I_{\text{нав}} \cos(\omega t), \quad (8)$$

где $i_{\text{ну}} = I_{\text{ст}} + I_{\text{нав}} \sin(\omega t)$ – общий мгновенный ток НУ; $I_{\text{ст}}$ – стабилизируемое значение тока; $I_{\text{нав}}$ – амплитуда наводимых пульсаций; ω – угловая частота наводимых пульсаций.

Поскольку и падение напряжения на активном сопротивлении НРЭ $v_{R_{\text{нрэ}}} = i_{\text{ну}} R_{\text{нрэ}}$, и падение напряжения на самом регулирующем элементе $v_{\text{рэ}}$ будут меняться с изменением величины протекающего через НРЭ тока, то для поддержания регулирующего элемента в проводящем состоянии необходимо, чтобы общее мгновенное падение напряжения на НРЭ $v_{\text{нрэ}}$ удовлетворяло условию

$$\min(v_{\text{нрэ}}) = U_{\text{нрэСТ}} + \min(v_{Lk}) > v_{\text{рэ}} + v_{R_{\text{нрэ}}}, \quad (9)$$

где $U_{\text{нрэСТ}}$ – постоянное напряжение, стабилизируемое на НРЭ.

Наименьшему напряжению НРЭ $v_{\text{нрэ}}$ будет соответствовать момент времени, при котором $\cos(\omega t) = -1$ ($\sin(\omega t) = 0$). Тогда с учётом уравнения (8) можно переписать условие (9) как

$$U_{\text{нрэСТ}} - L_k \omega I_{\text{нав}} > v_{\text{рэ}} + I_{\text{ст}} R_{\text{нрэ}}. \quad (10)$$

Учитывая, что $\omega = 2\pi f$, из неравенства (10) можно сформулировать условие, обеспечивающее отсутствие нелинейных искажений в наводимых с частотой f тестовых сигналах по входному току, обусловленных выходом регулирующего элемента из проводящего режима:

$$f < \frac{U_{\text{нрэСТ}} - v_{\text{рэ}} - I_{\text{ст}} R_{\text{нрэ}}}{2\pi L_k I_{\text{нав}}}. \quad (11)$$

Приравняв обе части неравенства (11), можно также получить значение наибольшей частоты наводимых пульсаций f_{max} , при которой будут отсутствовать нелинейные искажения по форме входного тока. Из выражения (11) видно, что при увеличении индуктивности кабельной линии (и выходной индуктивности испытуемой СЭП) частота f_{max} уменьшается, в результате чего при использовании топологии «ж» появляется зависимость максимальной амплитуды наводимых помех от индуктивной составляющей импеданса СЭП и соединительных проводов. Кроме того, выражение (11) показывает, что индуктивность L_k

влияет не только на максимальную частоту пульсаций f_{max} , но и на наибольшее значение амплитуды наводимых колебаний $I_{\text{нав}}$ на каждой частоте. Таким образом, в последовательной топологии до некоторой частоты существует возможность наводить пульсации по входному току амплитудой, равной полной величине стабилизируемого через НУ тока, обеспечивая при этом рекуперацию большей части тока в питающую сеть, что недостижимо в параллельных топологиях.

Заключение. Полученные результаты позволяют сделать вывод относительно выбора той или иной топологии на основе требований, выдвигаемых к НУ. При повышенных требованиях к живучести использование топологий «а» и «б» является более целесообразным, поскольку в них возможно обеспечение продолжения работы в случаях, когда НРЭ оказывается в аварийном режиме. Топологии «а» и «б» также являются более простыми в проектировании и отработке, поскольку существует возможность независимого испытания НРЭ и ИП. При необходимости наведения пульсаций большой амплитуды с сохранением высокого показателя рекуперации, последовательная топология «ж» является наиболее подходящей. Однако для наведения помех в широком диапазоне частот лучшие результаты могут быть достигнуты с топологиями «б» и «в». Топологии «ж» присущи самые малые значения входного адмиттанса на низких частотах, к тому же топология «ж» более чувствительна к величине выходной индуктивности испытуемой СЭП. Однако в топологии «ж» посредством быстродействующего НРЭ происходит фильтрация стабилизируемого входного тока, что обеспечивает более низкий уровень пульсаций, чем в параллельных топологиях, при равных массогабаритных характеристиках.

Благодарности. Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации (Соглашение о предоставлении субсидии № 14.577.21.0082, уникальный идентификатор RFMEFI57714X008) и АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва».

Acknowledgements. This study was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Government Contract 14.577.21.0082, unique identifier RFMEFI57714X008) and JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”.

Библиографические ссылки

1. A high-flexibility DC load for fuel cell and solar arrays power sources based on DC–DC converters /

- E. Duran [et al.] // *Applied Energy Journal*. 2011. Vol. 88. P. 1690–1702. DOI: 10.1016/j.apenergy.2010.11.002.
2. Locment F., Sechilariu M., Houssamo I. DC Load and Batteries Control Limitations for Photovoltaic Systems. Experimental Validation // *IEEE Trans. on Power Electronics*. 2012. Vol. 27(9). P. 4030–4038. DOI: 10.1109/TPEL.2012.2189134.
3. Ceylan M., Balicki A. Design and Implementation of an Electronic Constant Current DC Load for Battery Discharge and Power Supply Test Systems // 16th Intern. Power Electronics and Motion Control Conf. and Exposition. 2014. P. 924–927. DOI: 10.1109/EPEPEMC.2014.6980625.
4. Locment F., Sechilariu M., Houssamo I. A Sliding-Mode Duty-Ratio Controller for DC/DC Buck Converters With Constant Power Loads // *IEEE Trans. on Power Electronics*. 2012. Vol. 27(9). P. 4030–4038. DOI: 10.1109/TPEL.2012.2189134.
5. Kakigano H., Miura Y., Ise T. Low-Voltage Bipolar-Type DC Microgrid for Super High Quality Distribution // *IEEE Trans. on Power Electronics*. 2010. Vol. 25(12). P. 3066–3075. DOI: 10.1109/TPEL.2010.2077682.
6. Design and Implementation of Power Electronic Load Used to Test Tidal Current Energy Generator Sets / S. Wang [et al.] // *IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*. 2014. P. 354–358. DOI: 10.1109/FUZZ-IEEE.2014.6891752.
7. Adjustable 20 kW full-SiC electronic load with energy recovery for medium-frequency inverter / F. Denk [et al.] // *PCIM Europe 2016; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*. 2016. P. 1721–1727.
8. Bouaicha A., Allagui H., Mami A. Study of an electronic load for measuring the internal impedance of a PEM fuel cell // *Systems, Signals & Devices (SSD) : 10th Intern. Multi-Conference on*. 2013. P. 1–5.
9. Design and Analysis of a Digital Controller for Boost Converter with Renewable Energy Sources for Domestic DC Load / O. Ibrahim [et al.] // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 785. P. 141–145. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.785.141.
10. Constant Current Control of DC Electronic Load based on Boost Topology / G. Hu [et al.] // *Elektronika ir Elektrotechnika*. 2014. Vol. 20(2). P. 36–39. DOI: 10.5755/j01.eee.20.2.6381.
11. Ying C. Design of 300A constant current electronic load // *Selected Papers of the Photoelectronic Technology Committee Conferences*. 2015. P. 1–7. DOI: 10.1117/12.2228515.
12. Research on Power Electronic Load: Topology, Modeling, and Control / X. She [et al.] // *Applied Power Electronics Conference and Exposition. APEC – 2009 : Twenty-Fourth Annual IEEE*. 2009. P. 1661–1666. DOI: 10.1109/APEC.2009.4802891.
13. Tsang K. M., Chan W. L. Fast Acting Regenerative DC Electronic Load Based on a SEPIC Converter // *IEEE Trans. on Power Electronics*. 2012. Vol. 27(1). P. 269–275. DOI: 10.1109/TPEL.2011.2158446.
14. Upadhyay S., Mishra S., Joshi A. A Wide Bandwidth Electronic Load // *IEEE Trans. on Industrial Electronics*. 2012. Vol. 59(2). P. 733–739. DOI: 10.1109/TIE.2011.2148680.
15. Fedchenko A. S., Lobanov D. K., Mizrah E. A. Design Principles and Classification of the Adjustable Electronic Loads of Electrical Power Systems of Spacecrafts // *International Journal of Applied Engineering Research (IJAER)*. 2015. Vol. 10(20). P. 41004–41010.
16. Лобанов Д. К., Федченко А. С., Мизрах Е. А. Моделирование нагрузочного устройства рекуперационного типа // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2012. Вып. 8. С. 172–173.
17. Мизрах Е. А., Лобанов Д. К. Динамический синтез нагрузочных устройств с рекуперацией электроэнергии в сеть электропитания испытательного комплекса энергосистем космического аппарата // *Вестник СибГАУ*. 2005. Вып. 4(12). С. 142–148.
18. Мелешин В. И., Овчинников Д. А. Управление транзисторными преобразователями электроэнергии. М.: Техносфера, 2011. 576 с.
19. Мизрах Е. А. Частотный метод динамического синтеза имитаторов первичных источников электроэнергии космических аппаратов // *Вестник СибГАУ*. 2005. Вып. 4(12). С. 56–59.

References

1. Duran E., Andujar J. M., Segura F., Barragan A. J. A high-flexibility DC load for fuel cell and solar arrays power sources based on DC–DC converters *Applied Energy Journal*. 2011, Vol. 88, P. 1690–1702. DOI: 10.1016/j.apenergy.2010.11.002.
2. Locment F., Sechilariu M., Houssamo I. DC Load and Batteries Control Limitations for Photovoltaic Systems. Experimental Validation *IEEE Trans. on Power Electronics*. 2012, Vol. 27(9), P. 4030–4038. DOI: 10.1109/TPEL.2012.2189134.
3. Ceylan M., Balicki A. Design and Implementation of an Electronic Constant Current DC Load for Battery Discharge and Power Supply Test Systems. *16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition*. 2014, P. 924–927. DOI: 10.1109/EPEPEMC.2014.6980625.
4. Locment F., Sechilariu M., Houssamo I. A Sliding-Mode Duty-Ratio Controller for DC/DC Buck Converters With Constant Power Loads. *IEEE Trans. on Power Electronics*. 2012, Vol. 27(9), P. 4030–4038. DOI: 10.1109/TPEL.2012.2189134.
5. Kakigano H., Miura Y., Ise T. Low-Voltage Bipolar-Type DC Microgrid for Super High Quality Distribution. *IEEE Trans. on Power Electronics*. 2010, Vol. 25(12), P. 3066–3075. DOI: 10.1109/TPEL.2010.2077682.
6. Wang S., Li M., Chen Z. et al. Design and Implementation of Power Electronic Load Used to Test Tidal Current Energy Generator Sets. *IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*. 2014, P. 354–358. DOI: 10.1109/FUZZ-IEEE.2014.6891752.
7. Denk F., Haehre K., Koerner J. et al. Adjustable 20 kW full-SiC electronic load with energy recovery for medium-frequency inverter. *PCIM Europe 2016; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management; Proceedings of*. 2016, P. 1721–1727.

8. Bouaicha A., Allagui H., Mami A. Study of an electronic load for measuring the internal impedance of a PEM fuel cell. *Systems, Signals & Devices (SSD)*. 2013 10th International Multi-Conference on. 2013, P. 1–5.
9. Ibrahim O., Yahaya N. Z., Saad N. et al. Design and Analysis of a Digital Controller for Boost Converter with Renewable Energy Sources for Domestic DC Load. *Applied Mechanics and Materials*. 2015, Vol. 785, P. 141–145. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.785.141.
10. Hu G., Wie Y., Lei H. et al. Constant Current Control of DC Electronic Load based on Boost Topology. *Elektronika ir Elektrotechnika*. 2014, Vol. 20(2), P. 36–39. DOI: 10.5755/j01.eee.20.2.6381.
11. Ying C. Design of 300A constant current electronic load. *Selected Papers of the Photoelectronic Technology Committee Conferences*. 2015, P. 1–7. DOI: 10.1117/12.2228515.
12. She X., Zou Y., Wang C. et al. Research on Power Electronic Load: Topology, Modeling, and Control. *Applied Power Electronics Conference and Exposition*. 2009, APEC 2009, Twenty-Fourth Annual IEEE, 2009, P. 1661–1666. DOI: 10.1109/APEC.2009.4802891.
13. Tsang K. M., Chan W. L. Fast Acting Regenerative DC Electronic Load Based on a SEPIC Converter. *IEEE Trans. on Power Electronics*. 2012, Vol. 27(1), P. 269–275. DOI: 10.1109/TPEL.2011.2158446.
14. Upadhyay S., Mishra S., Joshi A. A Wide Bandwidth Electronic Load. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*. 2012, Vol. 59(2), P. 733–739. DOI: 10.1109/TIE.2011.2148680.
15. Fedchenko A. S., Lobanov D. K., Mizrah E. A. Design Principles and Classification of the Adjustable Electronic Loads of Electrical Power Systems of Spacecrafts. *International Journal of Applied Engineering Research (IJAER)*. 2015, Vol. 10(20), P. 41004–41010.
16. Lobanov D. K., Fedchenko A. S., Mizrah E. A. [Modeling of the recovery-type electronic load]. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavтики* [Actual problems of aviation and cosmonautics]. 2012, Krasnoyarsk, P. 172–173 (In Russ.).
17. Mizrah E. A. Lobanov D. K. [Dynamic synthesis of electronic loads with recovery of energy to spacecraft testing setup power supply network]. *Vestnik SibGAU*. 2005, No. 4(12), P. 142–148 (In Russ.).
18. Meleshin V. I. *Upravlenye tranzistornymi preobrazovatelyami elektroenergii* [Transistor electrical converters control]. 2011, Moscow, Tehnosfera Publ., 576 p.
19. Mizrah E. A. Lobanov D. K. [Frequency method of dynamic synthesis of spacecraft primary electrical sources simulators]. *Vestnik SibGAU*. 2005, No. 4(12), P. 56–59 (In Russ.).

© Федченко А. С., Мизрах Е. А.,
Лобанов Д. К., 2017

**МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ КОНТРОЛЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ
ПРИ ИСПЫТАНИЯХ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

Н. В. Штабель*, Л. А. Самотик, Е. А. Мизрах

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: shtabnik@gmail.com

Одной из особенностей современных систем электропитания космического аппарата является связь силовой шины «минус» с корпусом, это делается в целях защиты от статического заряда, накапливаемого на корпусе, который может привести к появлению высокой разности потенциалов между токоведущими частями системы электропитания и корпусом, что приводит к ухудшению помеховой обстановки, а также к возможному электрическому пробое изоляции токоведущих элементов системы электропитания. Недостатком этого решения является возникающая опасность замыкания плюсовых шин системы электропитания на корпус, что, в свою очередь, может привести к короткому замыканию и выходу из строя составных частей системы электропитания и кабельной сети. С целью исключения аварийных ситуаций в ходе испытаний и эксплуатации космического аппарата авторами разрабатывается устройство непрерывного контроля сопротивления изоляции, основанное на бесконтактном измерении токов утечки на каждой линии системы электропитания. При этом величина измеряемых дифференциальных токов весьма мала и может составлять десятки микроампер. Применяемые в настоящее время датчики малых токов имеют недостатки, проявляющиеся в значительном влиянии магнитных полей от силовых токов, которые приводят к увеличению погрешности датчика и, следовательно, к повышению погрешности контроля сопротивления изоляции. Авторами были исследованы датчики тока, предложен метод компенсации изученных погрешностей измерения с применением дополнительного датчика тока, разработано и исследовано устройство, использующее предложенный принцип, и проведено экспериментальное исследование опытного образца устройства. Разработанное устройство внедрено на рабочем месте лабораторно-отрабочных испытаний космического аппарата, в настоящее время проводятся дополнительные исследования и отработка новых методов, повышающих качество и точность контроля сопротивления изоляции.

Ключевые слова: испытания, система электропитания, космический аппарат, сопротивление изоляции, токи утечки.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 3, P. 628–632

**IMPROVEMENT OF INSULATION RESISTANCE MEASUREMENT ACCURACY
DURING SPACECRAFT POWER SYSTEM TESTS**

N. V. Shtabel*, L. A. Samotik, E. A. Mizrah

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: shtabnik@gmail.com

Modern spacecraft power systems features connection of ground power bus with satellite body, which aims to improve noise immunity and protect power system and its modules from possible breakdown due to static charge accumulation on spacecraft body, which can lead to high voltages between spacecraft body and power system sensitive electronic components. The main disadvantage of this solution is a possibility of short circuit between any high voltage power system bus and spacecraft body, which can easily lead to breakdown of power system modules, payload elements and wire harness, making satellite dysfunctional. To prevent such malfunction situations during terrestrial testing and spacecraft lifetime the authors developed automatic insulation resistance continuous monitoring device based on contactless leakage current measurements on every spacecraft power system line. In the device magnitude of measured differential currents can be very low, in order of microamperes. Modern magnetic modulation based leakage current sensors has a major flaw which leads to great influence of high current magnetic field on a measurement result and highly increased insulation resistance measurement error. The authors has studied magnetic modulation based leakage current sensors, proposed the method of error compensation for studied measurement errors using additional current sensor, developed and tested device using proposed principles and done experimental study of device development version. Developed automatic insulation resistance continuous monitoring device implemented on the laboratory

spacecraft power system test bench, at present the authors are preparing additional experiments to improve methodology, quality, accuracy and convenience of recently introduced insulation resistance measurement methods.

Keywords: testing, power system, spacecraft, insulation resistance, leakage currents.

Введение. Одной из особенностей системы электропитания (СЭП) космического аппарата (КА) является связь силовой токоведущей шины (обычно шины «минус») с корпусом. В ходе испытаний электрооборудования КА возможно нарушение целостности изоляции шин и замыкание их на корпус. При этом напряжение на силовых шинах может достигать 200 В, величина токов при коротком замыкании может составлять до 100–150 А. Это может угрожать жизни и здоровью персонала, а также привести к аварийной ситуации и повреждению дорогостоящего оборудования, поэтому обнаружение токов утечки и контроль целостности изоляции необходимы для обеспечения безопасности персонала и предотвращения повреждения оборудования КА и испытательного оборудования [1].

В настоящее время при испытаниях энергопреобразующей аппаратуры (ЭПА) КА широко применяется контроль сопротивления изоляции, проводимый до начала испытаний с помощью внешних источников контрольного тока, например мегаомметром [2]. Однако такой метод имеет ограниченное применение, так как при наличии в системе электропитания ключей для коммутации источников питания и нагрузок такой метод позволяет лишь оценить сопротивление изоляции соединительных проводов и не охватывает возможные утечки в полезной нагрузке и первичных источниках питания.

Существуют методы контроля сопротивления изоляции, основанные на измерении напряжения между плюсовыми шинами системы и корпусом, однако их область применения также ограничена,

поскольку в этом случае определяется только эквивалентное сопротивление изоляции всех линий относительно корпуса, но отсутствует информация о сопротивлении изоляции каждой линии, следовательно, локализовать аварийную линию затруднительно [3–6]. Также этот класс методов не позволяет получить информацию о сопротивлении между шиной «минус» и корпусом.

Предлагаемый метод контроля сопротивления изоляции основан на бесконтактном измерении токов утечки с помощью датчиков постоянного тока на основе магнитной модуляции [7; 8]. В основу метода положен принцип измерения дифференциальных токов каждой из шин питания, появляющихся при снижении сопротивления изоляции [9]. На каждую из контролируемых шин питания устанавливается датчик, через магнитопровод которого продеваются плюсовая и минусовая шины так, что датчик измеряет разность токов, протекающих в нагрузку из источника и обратно. В случае возникновения электрической связи между плюсовой шиной и корпусом через сопротивление изоляции $R_{ут}$, ток утечки будет протекать в источник через корпус, следовательно, ток, протекающий из нагрузки в источник, окажется меньше – датчик покажет разность токов. Зная величину тока утечки и напряжения линии, можно вычислить сопротивление утечки $R_{ут}$ [10].

Структура предлагаемого устройства. Структура рабочего места испытаний ЭПА с устройством контроля сопротивления изоляции на основе предлагаемого метода показана на рис. 1.

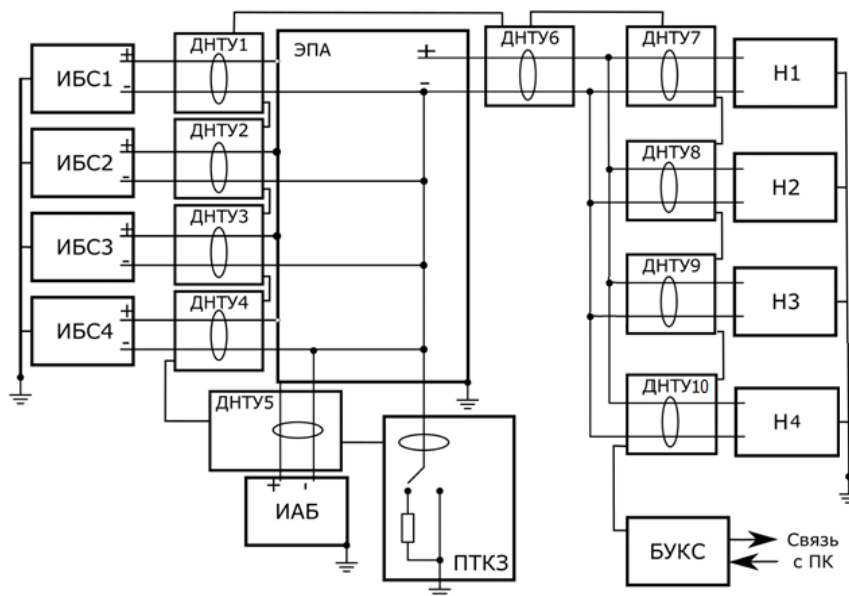


Рис. 1. Структура рабочего места испытаний ЭПА с устройством контроля сопротивления изоляции

Fig. 1 Structure of spacecraft energy conversion equipment test bench with automatic insulation resistance continuous monitoring device

В составе рабочего места используются ИБС1–ИБС4 – имитаторы солнечной батареи, ИАБ – имитатор аккумуляторной батареи, Н1–Н4 – нагрузки, ЭПА – испытываемая энергопреобразующая аппаратура.

Устройство контроля сопротивления изоляции состоит из следующих модулей: ДНТУ1–ДНТУ10 – датчики напряжения линий и токов утечки; ПТКЗ – прерыватель тока короткого замыкания; БУКС – блок управления, контроля и сигнализации.

Предлагаемый метод позволяет непрерывно контролировать сопротивление изоляции плюсовых шин в имитаторах первичных источников электроэнергии (ИПИЭ) ИБС1–ИБС4, ИАБ и нагрузках Н1–Н4 в процессе испытаний, а также соединительных кабелей на участках от модулей ИПИЭ до ДНТУ и от нагрузки до ДНТУ. Контроль производится на основании показаний датчиков напряжения и токов утечки, расположенных на каждой из линий питания. При этом измеряются напряжения и токи утечки на каждой линии, затем они передаются в блок управления, контроля и сигнализации, где производится расчет сопротивления изоляции каждой из линий. Информация о сопротивлении изоляции каждой линии позволяет уменьшить время поиска участка сети со сниженным сопротивлением изоляции, что уменьшает общую вероятность возникновения аварийной ситуации, что особенно актуально для систем большой мощности [11].

Метод повышения точности. Особенностью предлагаемого метода является блок ПТКЗ, устанавливаемый в месте связи шины «минус» с корпусом и выполняющий три функции:

- обеспечение работы СЭП в процессе испытания в следующих режимах: шина «минус» связана с корпусом и шина «минус» отключена от корпуса;
- измерение токов, протекающих из корпуса на шину «минус»;
- размыкание связи шины «минус» с корпусом при коротком замыкании плюсовой шины на корпус для защиты оборудования от протекания больших токов [12].

Введение в схему контроля сопротивления изоляции датчика тока, расположенного в ПТКЗ и рассчитанного на измерение малых токов (до 100 мА), позволяет дополнить информацию, получаемую с датчиков напряжения и токов утечки.

Так как все токи утечки с плюсовых шин протекают по контуру шина «плюс» – корпус – шина «минус», то датчик тока, расположенный в единственном месте соединения минусовой шины и корпуса, покажет их суммарную величину.

Таким образом, основываясь на показаниях датчика тока ПТКЗ и ДНТУ, можно сделать вывод не только об утечках со стороны источников и нагрузок, как отмечалось выше, но и о сопротивлении изоляции в ЭПА и соединительных кабелях от ЭПА до ИПИЭ.

Получить точную информацию о месте возникновения утечки в этом случае невозможно, однако можно оценить сопротивление изоляции, основываясь на известных напряжениях всех линий.

Результаты испытаний. Авторами был разработан, изготовлен и внедрен в эксплуатацию на рабочем месте лабораторно-отрабочных испытаний СЭП (ЛОИ СЭП) опытный образец устройства контроля сопротивления изоляции.

Для создания опытного образца были заданы следующие технические характеристики:

- количество одновременно контролируемых линий: 10;
- диапазон измеряемых токов утечки: от 0,02 до 100 мА;
- максимальное значение напряжения линии: 210 В;
- максимальный рабочий ток линии: 150 А;
- диапазон определения сопротивления изоляции: от 1 до 1000 кОм;
- погрешность определения сопротивления изоляции: не более 20 %;
- время защиты при коротком замыкании: не более 25 мкс [13].

Для оценки погрешности контроля сопротивления изоляции использовалась схема, представленная на рис. 2. Для имитации ИПИЭ используется лабораторный блок питания, для имитации нагрузки – резистивный блок нагрузок. Коробка соединительная имитирует ЭПА. В схеме использованы два ДНТУ, что позволяет проверить все возможные случаи возникновения утечек: со стороны ИП, со стороны нагрузки, а также в ЭПА.

В ходе испытаний имитировалось ухудшение сопротивления изоляции между точками +ИП, +Н, +КС и корпусом с помощью резисторов номинала 1, 240, 1000 кОм. При этом мультиметром контролировались фактический ток утечки, напряжение линии и показания устройства контроля изоляции, после чего производился расчет относительной погрешности измерения сопротивления изоляции.

Оценка погрешности контроля сопротивления изоляции производилась для четырех напряжений: 20, 60, 100, 120 В, при этом СЭП работала в режиме «минус» соединен с корпусом». Результаты исследования приведены на рис. 3.

На рис. 3 видно, что с увеличением напряжения линии погрешность уменьшается. Это объясняется большими величинами тока утечки и, следовательно, меньшим влиянием погрешности измерения датчика тока утечки на результат измерений.

Заключение. В ходе выполнения работы был разработан метод повышения точности контроля сопротивления изоляции, на основе метода было разработано устройство, уменьшающее погрешность контроля сопротивления изоляции с 30 % [14] до менее чем 20 %, как показали испытания. Разработанное устройство внедрено на рабочем месте ЛОИ СЭП КА в АО «ИСС» [15]. Дальнейшими направлениями исследований являются разработка улучшенных датчиков тока с меньшей погрешностью измерения и применение интеллектуальных алгоритмов фильтрации измерений для автоматизации оповещения оператора об изменениях сопротивления изоляции.

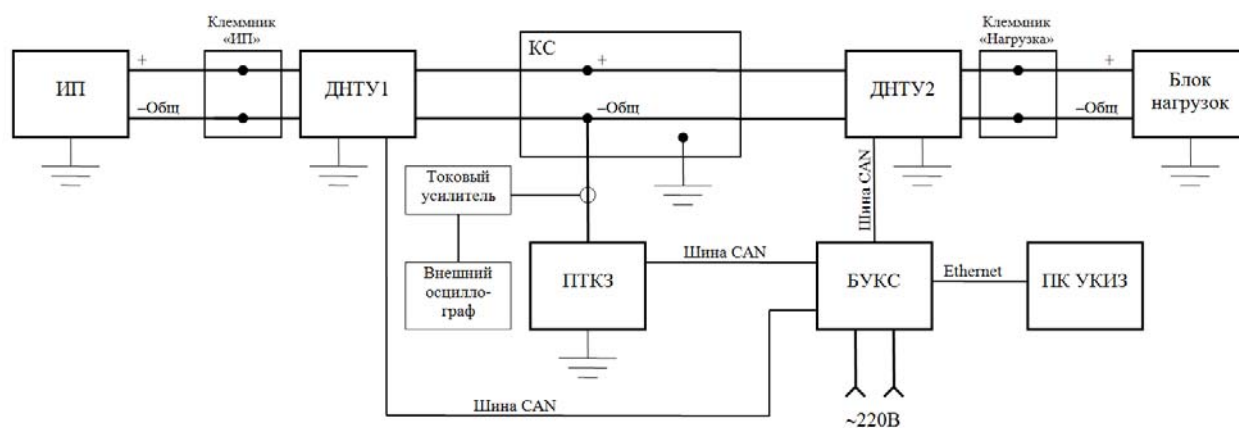


Рис. 2. Схема исследования погрешности контроля сопротивления изоляции

Fig. 2. Experiment scheme for studying insulation resistance monitoring device measurement error

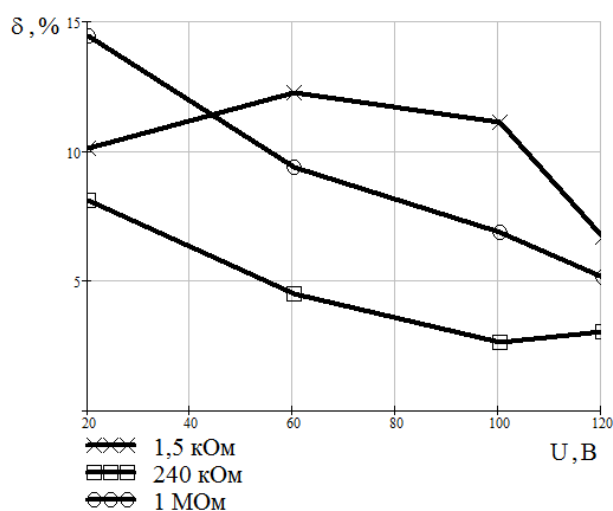


Рис. 3. Зависимость погрешности контроля сопротивления изоляции от напряжения линии:
 δ – усредненная погрешность для сопротивлений 1,5 кОм, 240 кОм, 1 МОм

Fig. 3. Insulation resistance measurement error experimental dependency from line voltage
 δ – averaged error for insulation resistance of 1,5 k Ω , 240 k Ω , 1 M Ω

Благодарности. Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации (Соглашение о предоставлении субсидии № 14.577.21.0082, уникальный идентификатор RFMEFI57714X008) и АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва».

Acknowledgements. This study was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Government Contract 14.577.21.0082, unique identifier RFMEFI57714X008) and JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”.

Библиографические ссылки

1. Федосов В. В. Надежность систем автоматического управления / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. С. 83–85.
2. Иванов Е., Дьячков А. Как правильно измерить сопротивление изоляции электроустановок // Новости электротехники. 2002. № 1 (13). С. 22.
3. Пат. 2391679 Российская Федерация, МПК 51 G 01 R 31/02. Способ автоматического контроля

сопротивления изоляции шин источников постоянного тока на корпус / ОАО «ИСС» (RU). № 2009103681/28 ; заявл. 04.02.2009 ; опубл. 10.06.2010.

4. Пат. 2351940 Российская Федерация, МПК 51 G 01 R 31/02. Способ автоматического контроля сопротивления изоляции шин источников постоянного тока на корпус / ОАО «ИСС» (RU). № 2006132155/28 ; заявл. 06.09.2006 ; опубл. 20.03.2008.
5. Пат. 561149 СССР, МПК G 01 R 27/18. Устройство для контроля сопротивления изоляции сетей постоянного тока / Андрущенко А. Г., Фомин Н. Ф., Журавель Е. В. (RU). № 2339999/21 ; заявл. 02.04.1976 ; опубл. 5.06.1977.

6. Пат. 2072602 Российская Федерация, МПК H 02 H 3/16, H 02 H 5/10. Устройство защитного отключения электроприбора / Филиппов Н. И., Плиев К. В., Филиппова О. Т. № 94027952/07 ; заявл. 25.07.1994 ; опубл. 27.01.1997.

7. Cheng C. F., Li R. S., Chen J. R. Design of the DC leakage current sensor with magnetic modulation-based scheme // IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Taipei, Taiwan, 2013. P. 1–6.

8. Ponjavic M. M., Duric R. M. Nonlinear Modeling of the Self-Oscillating Fluxgate Current Sensor // *IEEE Sensors Journal*. 2007. Vol. 7, № 11 P. 1546–1553.

9. Pejovic P. A simple circuit for direct current measurement using a transformer // *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*. 1998. Vol. 45, № 8. P. 830–837.

10. Штабель Н. В., Мизрах Е. А., Ушаков А. В. Система контроля токов утечки и сопротивления изоляции для системы электропитания космического аппарата // Решетневские чтения : материалы XX юбилейной Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (09–12 нояб. 2016, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. С. 466–468.

11. Yang J., Fletcher J. E., O'Reilly J. Short-Circuit and Ground Fault Analyses and Location in VSC-Based DC Network Cables // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2012. Vol. 59, № 10. P. 3827–3837.

12. Фоос Р. Л., Штабель Н. В. Экспериментальное исследование макета прерывателя тока короткого замыкания для сетей постоянного тока // Актуальные проблемы авиации и космонавтики [Электронный ресурс]. URL: <http://disk.sibsau.ru/index.php/s/TaJhLx43LOxPnpn> (дата обращения: 01.09.2017).

13. Штабель Н. В., Неведьев И. О. Система контроля токов утечки и сопротивления изоляции цепей системы электропитания космического аппарата // Актуальные проблемы авиации и космонавтики [Электронный ресурс] : URL: <http://disk.sibsau.ru/index.php/s/TaJhLx43LOxPnpn> (дата обращения: 01.09.2017).

14. ГОСТ Р МЭК 61557-2–2005. Сети электрические распределительные низковольтные напряжением до 1000 В переменного тока и 1500 В постоянного тока. Электробезопасность. Аппаратура для испытания, измерения или контроля средств защиты. Ч. 2. Сопротивление изоляции. М. : Стандартинформ, 2006. 4 с.

15. Штабель Н. В., Киселев П. А., Мизрах Е. А. Устройство для непрерывного контроля сопротивления изоляции в процессе испытаний системы электропитания космического аппарата // Сб. тезисов науч.-техн. конф. молодых специалистов АО «ИСС» (22–25 августа 2017, г. Железногорск) [Электронный ресурс]. URL: <https://ntk.iss-reshetnev.ru/index/collection.pdf> (дата обращения: 01.09.2017).

References

1. Fedosov V. V. *Nadezhnost' sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Automatic control systems reliability]. 2015, Krasnoyarsk, SibGAU Publ., P. 83–85 (In Russ.).

2. Ivanov E., D'yachkov A. [Correct way to measure insulation resistance]. *Novosti elektrotekhniki*. 2002, No. 1 (13), P. 22 (In Russ.).

3. JSC “ISS”. *Sposob avtomaticheskogo kontrolya soprotivleniya izolyatsii shin istochnikov postoyannogo toka na korpus*. [Automatic power supply bus insulation resistance measurement method]. Patent RF, no. 2391679, 2010.

4. JSC “ISS”. *Sposob avtomaticheskogo kontrolya soprotivleniya izolyatsii shin istochnikov postoyannogo toka na korpus*. [Automatic power supply bus insulation

resistance measurement method]. Patent RF, no. 2351940, 2008.

5. Andrushchenko A. G., Fomin N. F., Zhuravel' E. V. *Ustroystvo dlya kontrolya soprotivleniya izolyatsii setey postoyannogo toka* [Device for monitoring insulation resistance of DC networks]. Patent USSR, no. 561149, 1977.

6. Filippov N. I., Pliev K. V., Filippova O. T. *Ustroystvo zashchitnogo otklyucheniya elektropribora* [Electrical appliance ground fault protection device]. Patent RF, no. 2072602, 1997.

7. Cheng C. F., Li R. S., Chen J. R. Design of the DC leakage current sensor with magnetic modulation-based scheme. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Taipei, Taiwan, 2013, P. 1–6.

8. Ponjavic M. M., Duric R. M. Nonlinear Modeling of the Self-Oscillating Fluxgate Current Sensor. *IEEE Sensors Journal*. 2007, Vol. 7, No. 11, P. 1546–1553.

9. Pejovic P. A simple circuit for direct current measurement using a transformer. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*. 1998, Vol. 45, No. 8, P. 830–837.

10. Shtabel' N. V., Mizrakh E. A., Ushakov A. V. [Spacecraft power supply system leakage current detection and insulation resistance measurement system]. *Reshetnevskie chteniya: materialy XX Yubileynoy mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. pamyati general'nogo konstruktora raketno-kosmicheskikh sistem akademika M. F. Reshetneva* (09–12 noyab. 2016, g. Krasnoyarsk), 2016, Vol. 2, P. 466–467 (In Russ.).

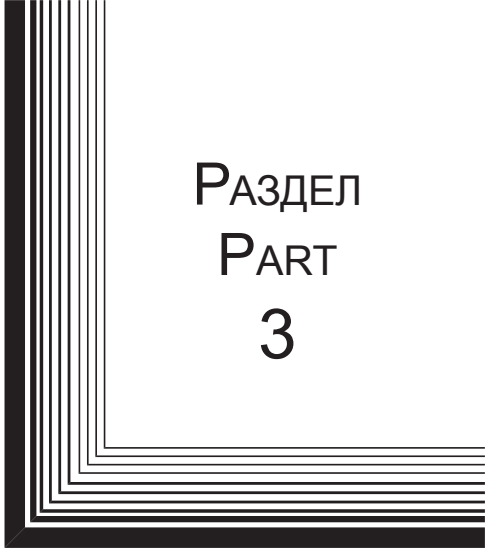
11. Yang J., Fletcher J. E., O'Reilly J. Short-Circuit and Ground Fault Analyses and Location in VSC-Based DC Network Cables *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2012, Vol. 59, No. 10, P. 3827–3837.

12. Foos R. L., Shtabel N. V. *Ekspperimental'noe issledovanie maketa preryvatel'ya toka korotkogo zamykaniya dlya setey postoyannogo toka* [Experimental study of short circuit breaker for DC networks]. Available at: <http://disk.sibsau.ru/index.php/s/TaJhLx43LOxPnpn> (accessed 01.09.2017).

13. Shtabel N. V., Nefedev I. O. *Sistema kontrolya tokov utechki i soprotivleniya izolyatsii tsepey sistemy elektropitaniya kosmicheskogo apparata* [Spacecraft power supply system leakage current and insulation resistance detection and measurement system]. Available at: <http://disk.sibsau.ru/index.php/s/TaJhLx43LOxPnpn> (accessed 01.09.2017).

14. *GOST R MEK 61557-2–2005. Seti elektricheskoye raspredelitel'nye nizkovol'tnye napryazheniem do 1000 V peremennogo toka i 1500 V postoyannogo toka. Elektrobezopasnost'. Apparatyura dlya ispytaniya, izmereniya ili kontrolya sredstv zashchity* [Electrical safety in low voltage distribution systems up to 1000 V a. c. and 1500 V d. c. Equipment for testing, measuring or monitoring of protective measures]. Moscow, Standartinform Publ., 2015, 34 p.

15. Shtabel N. V., Kiselev P. A., Mizrakh E. A. [Continuous insulation resistance monitoring device for spacecraft power system test]. *Sbornik tezisov nauchno-tehnicheskoy konferentsii molodykh spetsialistov AO “ISS”*. Available at: <https://ntk.iss-reshetnev.ru/index/collection.pdf> (accessed 01.09.2017).



РАЗДЕЛ
PART
3



ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
ПРОЦЕССЫ
И МАТЕРИАЛЫ

TECHNOLOGICAL
PROCESSES
AND MATERIALS SCIENCE



INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF USING A DEFLECTING SYSTEM FOR MAGNETIC FIELDS IMPACT COMPENSATION DURING ELECTRON-BEAM WELDING

A. A. Druzhinina^{1*}, V. D. Laptenok², P. V. Laptenok², A. V. Murygin²

¹Siberian Federal University

79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: druzhininasasha@rambler.ru

The impact of magnetic fields caused by thermoelectric currents and residual magnetization of the welded parts on the accuracy of an electron beam positioning along the welded joints is a complicated scientific and technical problem to achieve high quality of welds in the aerospace industry, shipbuilding and power engineering. Presented in the article mathematical models of distribution of magnetic fields of interference in the space between the electron beam gun and the surface of a welding workpiece and also inside a workpiece allow to calculate the quantitative characteristics of the electron beam deflection from welded joints. The authors propose to use a deflection system for compensation of magnetic interference impact. The deflection system must be set to a certain height above the workpiece to be welded. The authors obtained a mathematical model of the magnetic field induction of the deflecting system distribution along its axis which coincides with the optical axis of the electron beam gun. The coordinates of installation of the deflection system concerning the surface of the parts to be welded are determined using the presented mathematical models. Calculations showed that the height of installation of deflection system depends on the thickness of the welded components. Using the deflection system installed at a certain height above the workpiece to be welded allows to eliminate the impact of magnetic fields caused by thermoelectric currents and residual magnetization of the welded parts on the quality of welded joints.

Keywords: electron-beam welding, magnetic field, deflection system, electron beam, compensating system.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 3. С. 634–641

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТКЛОНЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ

А. А. Дружинина^{1*}, В. Д. Лаптенок², П. В. Лаптенок², А. В. Мурыгин²

¹Сибирский федеральный университет

Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: druzhininasasha@rambler.ru

Влияние магнитных полей, вызванных термоэлектрическими токами и остаточной намагниченностью свариваемых деталей, на точность позиционирования электронного пучка по стыку соединения является сложной научно-технической проблемой по достижению высокого качества сварных соединений в аэрокосмической отрасли, судостроении и энергетике. Представлены математические модели распределения магнитных полей помех в пространстве между электронно-лучевой пушкой и поверхностью свариваемого изделия, а также внутри изделия, которые позволяют рассчитать количественные характеристики отклонений пучка электронов от стыка соединения. Для компенсации влияния магнитных помех предлагается использовать отклоняющую систему, установленную на определенную высоту над свариваемым изделием. Авторами получена математическая модель распределения магнитной индукции поля отклоняющей системы вдоль ее оси, совпадающей с оптической осью электронно-лучевой пушки. С помощью представленных математических моделей определены координаты установки отклоняющей системы относительно поверхности свариваемых деталей. Расчеты показали, что высота установки отклоняющей системы зависит от толщины свариваемых деталей. Использование отклоняющей системы, установленной на определенной высоте над свариваемым изделием, позволяет устранить влияние на качество сварных соединений магнитных полей, вызванных термоэлектрическими токами и остаточной намагниченностью.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, магнитное поле, отклоняющая система, электронный пучок, компенсирующая система.

Introduction. High demands on quality of welded joints in aerospace branch, shipbuilding, automotive industry, nuclear power engineering assume precise alignment of an electron beam with an interfacing surface at the electron beam welding (EBW). The magnetic fields occurring during dissimilar materials welding and products with a residual magnetization cause a deflection of an electron beam from an optical axis of the electron beam gun in an interval from the gun to the welded product and on the depth of weld penetration channel as well. If these deflections exceed 0.3 mm, then they lead to incomplete root penetration, especially at welding of thicker parts [1–7].

A more perspective way of electron beam protection against magnetic fields interference is their compensation in a welding zone. For this purpose a longitudinal in relation to a welded joint component of a magnetic field is measured in area the electron beam gun – the welded product, and carry out its compensations [8; 9].

The compensation of a longitudinal component of a magnetic field impact on an electron beam when welding dissimilar materials can be carried out by applying the welded parts of the local compensating magnetic field, parallel to the interfacing surface which is generated by electromagnetic coils [10], or introduction of compensating currents to the welded product which are counter-directed to thermoEMF currents [11; 12]. When welding products from ferromagnetic materials compensation of a longitudinal component of a residual magnetization magnetic field can be carried out by means of the electromagnet creating a compensating magnetic field in the welded product, counter an interference field [12; 13].

These methods of magnetic fields compensation assume a possibility of a contact supply of the compensating field in the welded product that in some cases complicates their technical realization. Therefore consideration of a possibility of an interference magnetic field compensation by means of the deflection system located in an interval between the electron beam gun and the welded product is relevant.

Magnetic field of interference. It is known that welding of products from dissimilar materials is followed by the magnetic fields caused by action of thermoelectric currents.

In the absence of external magnetic fields distribution of an induction of a longitudinal component of the field in the channel of weld penetration has almost linear character [14; 15]. The size of an induction of a magnetic field has the maximal values B_0 on a product surface, decreases to the center of the channel of weld penetration and is defined from the ratio:

$$B_n(z) = B_0 \left(1 - \frac{2z}{\delta} + \frac{2l}{\delta} \right), \quad (1)$$

where B_0 – the size of a magnetic induction on a surface of the welded product near a joint; δ – thickness of the welded product; l – distance from the electron beam gun to a surface of the welded product.

Over the surface of welded parts in the space between a product and an electron beam gun a magnetic induction of a longitudinal component of the interference field decreases on dependence which is defined by expression [13]:

$$B_n(z) = B_0 \frac{\delta/2}{\delta/2 + (l-z)}. \quad (2)$$

Thus, distribution of a longitudinal component magnetic induction of the interference field on the way of an electron beam will be as follows

$$B_n(z) = \begin{cases} B_0 \frac{\delta/2}{\delta/2 + (l-z)}, & 0 \leq z \leq l; \\ B_0 \left(1 - \frac{2z}{\delta} + \frac{2l}{\delta} \right), & l < z \leq l + \delta. \end{cases} \quad (3)$$

The slope angle of an electron beam trajectory and amount of deflection of the beam from an axis of the electron beam gun can be estimated according to approximate formulas [8]:

$$\psi = \frac{e}{mV} \int_0^z B(z) dz; \quad (4)$$

$$x = \frac{e}{mV} \int_0^z \int_0^z B(z) dz, \quad (5)$$

where $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ – electron charge, Kl; V (m/s) – electron speed which can be calculated on the known accelerating voltage, U (B) [16]:

$$V = \frac{5,93 \cdot 10^5 \sqrt{U(1 + 0,983 \cdot 10^{-6} U)}}{1 + 1,967 \cdot 10^{-6} U},$$

m – electron mass determined by a formula

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}},$$

where $m_0 = 9,109 \cdot 10^{-31}$ – rest mass of electron, kg; $c = 2,977 \cdot 10^8$ – light velocity, m/s; $B(z)$ – the distribution law of a longitudinal component of a magnetic field induction in the space between a gun and a welded product.

Substituting (3) in formulas (4) and (5) and integrating ranging from 0 to $(l + \delta/2)$, we will get

$$\psi_n = \frac{e}{mV} \int_0^z B_n(z) dz = \frac{e}{mV} B_0 \frac{\delta}{2} \ln \frac{\delta + 2l}{\delta} + \frac{e}{mV} B_0 \frac{\delta}{4}; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} x_n &= \frac{e}{mV} \int_0^z \int_0^z B_n(z) dz = \\ &= \frac{e}{mV} B_0 \frac{\delta}{2} \left(l + \frac{\delta^2}{2} \ln \frac{\delta}{\delta + 2l} \right) + \frac{e}{mV} B_0 \frac{\delta^2}{12}. \end{aligned} \quad (7)$$

Formulas (6) and (7) allow to define the slope angle and amount of deflection of an electron beam from an optical axis of the gun caused by action of magnetic interferences in the center of the channel of weld penetration.

The size of the circulating thermoelectric currents can reach 100 A [17] and the deflection of an electron beam caused by these currents from an optical axis of the gun on a surface of a product can make 1 mm and more. Substituting expression (2) in formula (5), integrating in the range from 0 to l , it is possible to receive a formula for the definition of an induction of a magnetic field on the surface of the welded product near a joint on the known deflection of an electron beam from an optical axis of the gun

$$B_0 = \frac{2xmV}{e \cdot \delta \left(l + \frac{\delta^2}{2} \ln \frac{\delta}{\delta + 2l} \right)}. \quad (8)$$

The values of magnetic induction calculated by formula (8) at various deflections of x beam from an optical axis of the gun for products of various thickness δ are presented in tab. 1.

Thus, distribution of a longitudinal component magnetic induction of a residual magnetization field on the way of an electron beam will appear as:

$$B_n(z) = \begin{cases} B_0 \frac{\delta/2}{\delta/2 + (l-z)}, & 0 \leq z \leq l; \\ B_0, & l < z \leq l + \delta. \end{cases} \quad (9)$$

The compensating system. Compensation of the magnetic field rejecting an electron beam can be carried out in an interval between an electron beam gun and a welded product by means of compensating system representing electromagnetic coils placed in the metal cylinder made of a permalloy. The axis of the cylinder coincides with an optical axis of the electron beam gun (fig. 1).

In the vicinity of the compensating system center there is a zone of the homogeneous magnetic field. The size of an induction of a compensating system magnetic field in the arbitrary point with z coordinate on an axis of system can be described by the equation

$$B_c(z) = \frac{B_{\max} L^3}{2 \cdot 0.715} \times \left[\left(L^2 + \left(\frac{L}{2} + z \right)^2 \right)^{-\frac{3}{2}} + \left(L^2 + \left(\frac{L}{2} - z \right)^2 \right)^{-\frac{3}{2}} \right], \quad (10)$$

where $B_{\max}$ – the size of a magnetic induction in the center of the compensating system; L – the height of the compensating system (diameter of electromagnetic coils).

The normalized distribution of an induction of a magnetic field ($B_c(z)/B_{\max}$) of the compensating system on axis Z at $L = 25$ mm is presented in fig. 2.

Substituting (10) in formulas (4) and (5), considering that an origin of coordinates is ЭПН (Electron Beam Gun), integrating ranging from 0 to z , we will get

$$\psi_c = \frac{e}{mV} \cdot \frac{B_{\max} \cdot L}{2 \cdot 0.715} \times \left[\frac{z - a + \frac{L}{2}}{\sqrt{L^2 + \left(\frac{L}{2} + z - a \right)^2}} - \frac{\frac{L}{2} - a}{\sqrt{L^2 + \left(\frac{L}{2} - a \right)^2}} \right] +$$

$$+ \frac{e}{mV} \cdot \frac{B_{\max} \cdot L}{2 \cdot 0.715} \times \left[\frac{z - a - \frac{L}{2}}{\sqrt{L^2 + \left(\frac{L}{2} - z + a \right)^2}} + \frac{\frac{L}{2} + a}{\sqrt{L^2 + \left(\frac{L}{2} + a \right)^2}} \right], \quad (11)$$

$$x_c = \frac{e}{mV} \cdot \frac{B_{\max} \cdot L}{2 \cdot 0.715} \times \left[\sqrt{L^2 + \left(\frac{L}{2} + z - a \right)^2} - \sqrt{L^2 + \left(\frac{L}{2} - a \right)^2} \right] +$$

$$+ \frac{e}{mV} \cdot \frac{B_{\max} \cdot L}{2 \cdot 0.715} \times \left[\sqrt{L^2 + \left(\frac{L}{2} - z + a \right)^2} - \sqrt{L^2 + \left(\frac{L}{2} + a \right)^2} \right] +$$

$$+ \frac{e}{mV} \cdot \frac{B_{\max} \cdot L}{2 \cdot 0.715} \times \left[\frac{\left(\frac{L}{2} + a \right) z}{\sqrt{L^2 + \left(\frac{L}{2} + a \right)^2}} - \frac{\left(\frac{L}{2} - a \right) z}{\sqrt{L^2 + \left(\frac{L}{2} - a \right)^2}} \right]. \quad (12)$$

Operation of the compensating system has to be directed to elimination of a deflection of an electron beam from an optical axis of the gun and decrease of a tangent slope angle to a beam trajectory.

The system of equations

$$\begin{cases} \psi_n - \psi_c = 0, \\ x_n - x_c = 0, \end{cases} \quad (13)$$

allows to determine the size of a magnetic induction $B_{\max}$ necessary for elimination of a deflection of an electron beam from a gun axis, and distance of a where the compensating system concerning the gun has to be installed so that the beam trajectory slope angle was equal to zero in the center of the channel of weld penetration.

In fig. 3–5 schedules of dependence $\psi(a) = \psi_n - \psi_c$ a tangent slope angle to an electron beam trajectory from height of installation of the compensating system for the welded parts of various thickness made of dissimilar materials are submitted.

At a product thickness $\delta = 25$ mm the center of the compensating system has to be at the height of 43.05 mm from a product surface, at $\delta = 50$ mm – at the height of 36.98 mm, at $\delta = 100$ mm – at the height of 16.95 mm.

Table 1

Values of a magnetic induction of the field caused by a current of thermoEMF

δ , mm	25	50	100
x , mm	B_0 , мТл		
1	0.321	0.179	0.106
2.5	0.802	0.447	0.265
5	1,6	0.894	0.53

The analysis of the presented dependences shows: the size of a magnetic induction field caused by action of thermoelectric currents does not exert an impact on height of installation of the compensating system; if the distance from the gun to the welded product remains constant, then with the increase in thickness of a product up to some critical value the coordinate of the application of the compensating magnetic field approaches a product surface.

In tab. 2 the values of deflections of an electron beam are given in a root of penetration at compensation of the magnetic fields caused by thermoEMF currents for details of various thickness.

In fig. 6 schedules of dependence $\psi(a) = \psi_n - \psi_c$ a tangent slope angle to an electron beam trajectory from height of installation of the compensating system for the welded parts with a residual magnetization of various thickness are given.

At a product thickness $\delta = 25$ mm the center of the compensating system has to be at the height of 34.56 mm from a product surface, at $\delta = 50$ mm – at the height of 26.16 mm, at $\delta = 75$ mm – at the height of 15.2 mm; at a product thickness $\delta = 100$ mm technical realization of system of compensation of the considered design is impossible. It is necessary to apply a design of the compensating system with the magnetic tips used for concentration of a magnetic field. To use the considered compensating system it is necessary to limit acceptable magnetic fields of interference.

Let the center of the compensating system be located at the height of 17.5 mm from a product surface the thickness of which is equal to 100 mm. The solution of a system of equations

$$\begin{cases} x_n - x_c = 0, \\ x_{rn} - x_{rc} = 0.0003, \end{cases} \quad (14)$$

where 0.0003 – the maximum permissible deflection in a root of penetration, m; x_{rn} – the deflection in a root of penetration caused by action of the field of a residual magnetization; x_{rc} – the deflect in a root of penetration caused by action of a magnetic field of the compensating system; allows to determine the most admissible size of an induction of a magnetic field of a hindrance $B_0 = 0.1257$ мТл that corresponds to a magnetic intensity of 100 А/м.

In tab. 3 values of deflections of an electron beam are given in a root of penetration at compensation of fields of a residual magnetization of parts of various thickness.

Thus, for most cases happening in practice it is possible to define the distance from a product surface to the center of the compensating system providing acceptable values of a beam deflection in the root of penetration. During thicker products welding when this distance is very small and does not allow to realize compensation of a residual magnetization fields technically, it is necessary to introduce restrictions on the size of a magnetic field of interference induction.

Conclusion:

1. With the use of the deflection system installed at a particular height over the welded product, it is possible to eliminate an impact on the quality of welded joints of magnetic fields caused by thermoelectric currents and a residual magnetization.

2. At electron beam welding of products of larger thickness with a residual magnetization it is necessary to limit acceptable magnetization for the purpose of exception of incomplete penetration.

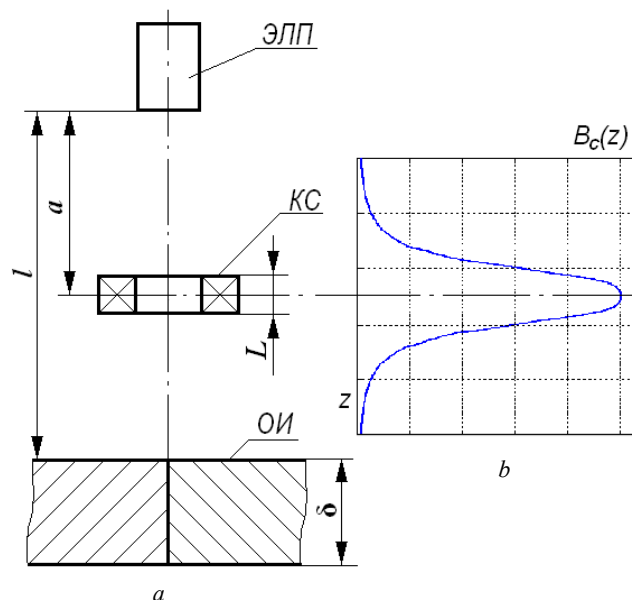


Fig. 1. The scheme of ЭЛС (Electron Beam Welding) installation with the compensating system (a) and distribution of an induction of a magnetic field of the compensating system (b): ЭЛП – the electron beam gun; КС – the compensating system; ОИ – a workpiece

Рис. 1. Схема установки ЭЛС с компенсирующей системой (a) и распределение индукции магнитного поля компенсирующей системы (б): ЭЛП – электронно-лучевая пушка; КС – компенсирующая система; ОИ – обрабатываемое изделие

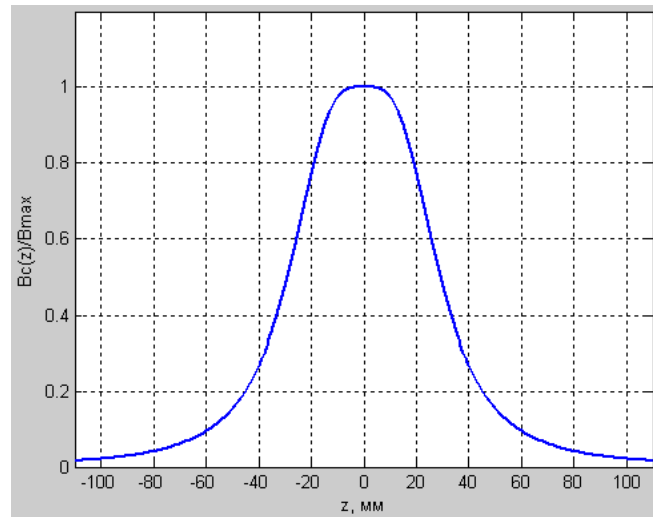


Fig. 2. Distribution of magnetic induction on axis Z

Рис. 2. Распределение магнитной индукции по оси Z

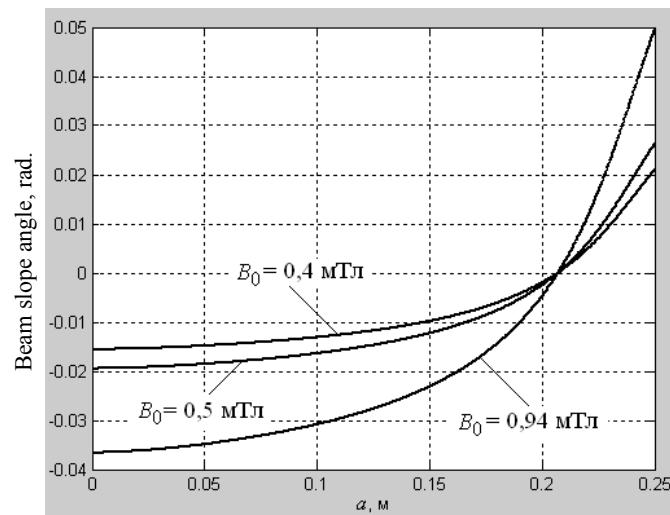


Fig. 3. Dependency $\psi(a)$ at $\delta = 25$ mm, $l = 250$ mm, $L = 25$ mm

Рис. 3. Зависимость $\psi(a)$ при $\delta = 25$ мм, $l = 250$ мм, $L = 25$ мм

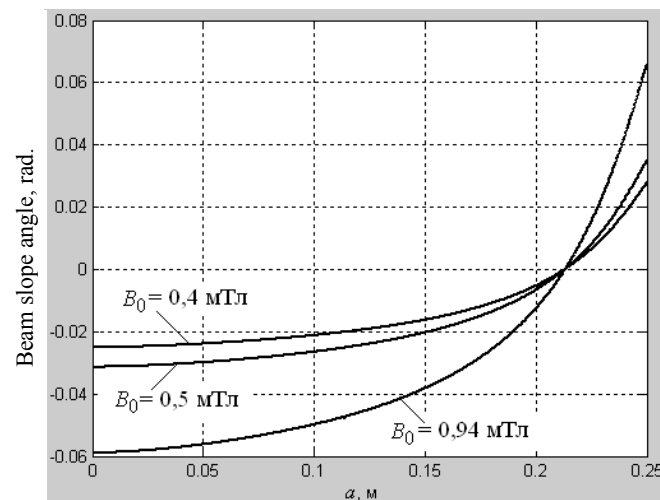


Fig. 4. Dependency $\psi(a)$ at $\delta = 50$ mm, $l = 250$ mm, $L = 25$ mm

Рис. 4. Зависимость $\psi(a)$ при $\delta = 50$ мм, $l = 250$ мм, $L = 25$ мм

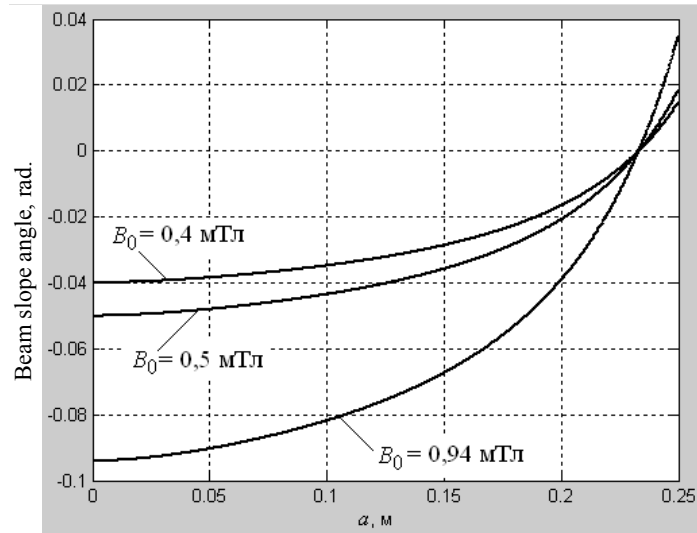


Fig. 5. Dependency $\psi(a)$ at $\delta = 100$ mm, $l = 250$ mm, $L = 25$ mm

Рис. 5. Зависимость $\psi(a)$ при $\delta = 100$ мм, $l = 250$ мм, $L = 25$ мм

Table 2

Deflections in a root of penetration at compensation of the magnetic fields caused by thermoelectric currents

δ , mm	25	50	100
B_0 , мТл	Beam deflection in a root of penetration, mm		
0.94	0.0576	0.2306	0.9222
0.5	0.0307	0.1226	0.4905
0.4	0.0245	0.0981	0.3924
0.3	0.0184	0.0736	0.2943

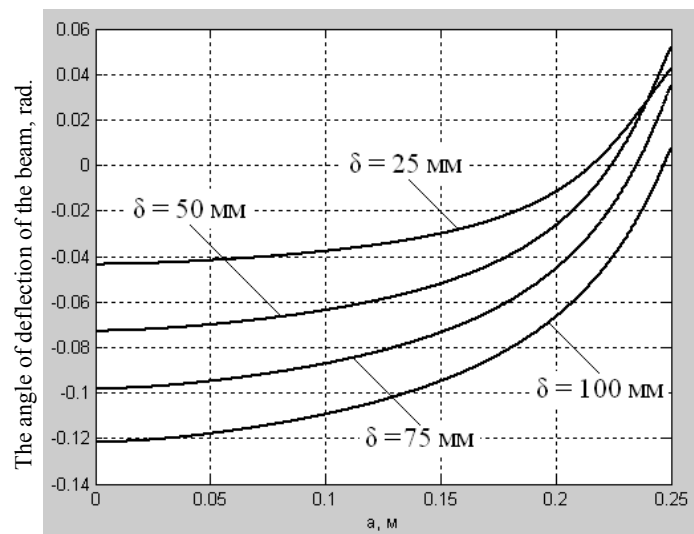


Fig. 6. Dependency $\psi(a)$ at $B_0 = 0.94$ мТл, $l = 250$ mm, $L = 25$ mm

Рис. 6. Зависимость $\psi(a)$ при $B_0 = 0.94$ мТл, $l = 250$ мм, $L = 25$ мм

Table 3

Deflections in a root penetration at compensation of fields of a residual magnetization

δ , mm	25	50	75	100
B_0 , мТл	Beam deflection in a root of penetration, mm			
0.94	0.0865	0.3458	0.7781	2.3
0.5	0.046	0.184	0.4139	1.2
0.4	0.0368	0.1472	0.3311	0.9593
0.2	0.0184	0.0736	0.1656	0.4797
0.125	0.0115	0.046	0.1035	0.2998

Acknowledgments. This research was supported by the territorial state autonomous institution “Krasnoyarsk Regional Fund for support of scientific and technical activity” as part of the project “Development of an automated complex of electron beam equipment for welding thin-walled units and parts of space vehicles”.

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке краевого государственного автономного учреждения «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности» в рамках реализации проекта «Разработка автоматизированного комплекса электронно-лучевой аппаратуры для сварки тонкостенных узлов и деталей космических аппаратов».

References

1. Nazarenko O. K. [Deflection of the electron beam in EBW]. *Avt. Svarka*. 1982, No. 1, P. 33–39 (In Russ.).
2. Decik V. N., Decik N. N., Nesterenko V. M. [The problems of combating residual magnetization of the rotor of the gas heater in EBW]. *Jelektronno-luchevaya svarka*. Moscow, 1986, P. 107–110.
3. Neporozhniy V. Yu. [Device for compensating residual magnetic field during electron beam welding of thick steel plates]. *Avt. Svarka*. 1984, No. 3, P. 68–70 (In Russ.).
4. Furner A. J. Electron beam welding thick section precipitation hardening steel. *Weld J*. 1981, No. 1, P. 18–66.
5. Kihara H., Minehisa S., Sacabata N., Shibuya X. High power electron beam welding of thick steel plates. Method for elimination beam deflection caused. *Weld. Wold*. 1984, Vol. 22, No. 516, P. 126–136.
6. Watanabe K., Shida T., Susuki H., Okamura H. A study on occurrence and prevention of defects of EBW. *J. Jap. Weld Sos*. 1975, Vol. 44, No. 2, P. 121–127.
7. Wei, P. S., Chih-Wei Wen. Missed joint induced by thermoelectric magnetic field in electron-beam welding dissimilar metals – Experiment and scale analysis. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2002, Vol. 33, Iss. 5, P 765–773.
8. Laptinok V. D., Murygin A. V., Seregin Yu. N., Braverman V. Ya. *Upravlenie elektronno-luchevoy svarkoy* [Control of electron beam welding]. Krasnoyarsk, SAA Publ., 2000, 234 p.
9. Laptinok V., Druzhinina A., Murygin A., Seregin Yu. Compensation of the effect of magnetic fields on the electron beam position in the process of electron beam welding. *Elektrotehnika & Elektronika E+E*. 2014, Vol. 49, No. 5-6, P. 62–67.
10. Мерфи Д. Т. *Sposob elektronno-luchevoy svarki i svarnye uzly, izgotovlennyye etim sposobom* [Method of electron beam welding and welded assemblies made by this method]. Patent PF, No. 2346795, 2009.
11. Laptinok V. D., Druzhinina A. A., Murygin A. V., Seregin Yu. N. Method to eliminate the impact of magnetic fields on the position of the electron beam during EBW. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2016, Vol 122, P. 012021. DOI: 10.1088/1757-899X/122/1/012021.
12. Bocharov A. N., Druzhinina A. A., Laptinok V. D., Laptinok P. V., Murygin A. V., Seregin Yu. N. *Ustroystvo*

dlya elektronno-luchevoy svarki [Device for electron beam welding]. Patent RF, No. 2547367, 2015.

13. Druzhinina A. A., Laptinok V. D., Murygin A. V. [Improvement of the positioning accuracy along the joint connection of details with the residual magnetization in electron beam welding]. *Vestnik SibGAU*. 2014, No. 5, P. 168–173 (In Russ.).
14. Dragunov V. K., Sliva A. P., Goncharov A. L., Chepurin M. V. *Sposob elektronno-luchevoy svarki raznorodnykh metallicheskih materialov* [Method of electron-beam welding of dissimilar metal materials]. Patent RF, No. 2534183, 2014.
15. Andreev A. D., Chernykh L. M. *Fizika. Magnetizm* [Physics. Magnetism]. St. Petersburg, 2009, 56 p. (In Russ.).
16. Glazer V. *Osnovy elektronnoy optiki* [Fundamentals of electronic optics]. Moscow, 1957, 764 p. (In Russ.).
17. Blakeley P.J., Sanderson A. The Origin and Effects of magnetic Fields in Electron Beam Welding. *Welding Journal*, 1984, Vol. 63, P. 42–49.

Библиографические ссылки

1. Назаренко О. К. Отклонение пучка электронов при ЭЛС // Автоматическая сварка. 1982. № 1. С. 33–39.
2. Децик В. Н., Децик Н. Н., Нестеренко В. М. Проблемы борьбы с остаточной намагниченностью при ЭЛС ротора газового нагревателя // Электронно-лучевая сварка. М. : МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1986. С. 107–110.
3. Непорожний В. Ю. Устройство для компенсации остаточного магнитного поля при электронно-лучевой сварке толстолистовых сталей // Автоматическая сварка. 1984. № 3. С. 68–70.
4. Furner A. J. Electron beam welding thick section precipitation hardening steel // Weld J. 1981. № 1. P. 18–66.
5. Kihara H., Minehisa S., Sacabata N., Shibuya X. High power electron beam welding of thick steel plates. Method for elimination beam deflection caused // Weld. Wold. 1984. Vol. 22, № 516. P. 126–136.
6. Watanabe K., Shida T., Susuki H., Okamura H. A study on occurrence and prevention of defects of EBW // J. Jap. Weld Sos. 1975. Vol. 44, № 2. P. 121–127.
7. Wei P. S., Chih-Wei Wen. Missed joint induced by thermoelectric magnetic field in electron-beam welding dissimilar metals – Experiment and scale analysis // Metallurgical and Materials Transactions B. 2002. Vol. 33, iss. 5. P 765–773.
8. Управление электронно-лучевой сваркой / В. Д. Лаптенко [и др.] ; под ред. В. Д. Лаптенка ; САА. Красноярск, 2000. 234 с.
9. Compensation of the effect of magnetic fields on the electron beam position in the process of electron beam welding / V. Laptinok [et al.] // Elektrotehnika & Elektronika E+E. 2014. Vol. 49, No 5–6. P. 62–67.
10. Пат. 2346795 Российская Федерация, МПК⁷ В 23 К 15/00. Способ электронно-лучевой сварки и сварные узлы, изготовленные этим способом / Мерфи Д. Т. № 2004100524/02 ; заявл. 06.01.2004 ; опубл. 20.02.2009, Бюл. № 5. 8 с.
11. Method to eliminate the impact of magnetic fields on the position of the electron beam during EBW /

V. D. Laptenok [et al.] // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 122. P. 012021.

12. Пат. 2547367 Российская Федерация, МПК⁷ В 23 К 15/00. Устройство для электронно-лучевой сварки / Бочаров А. Н., Дружинина А. А., Лаптенков В. Д., Лаптенков П. В., Мурыгин А. В., Серегин Ю. Н. № 2013133698/02 ; заявл. 18.07.2013 ; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 10. 8 с.

13. Дружинина А. А., Лаптенков В. Д., Мурыгин А. В. Повышение точности позиционирования по стыку соединения деталей с остаточной намагниченностью при электронно-лучевой сварке // Вестник СибГАУ. 2014. № 5. С. 168–173.

14. Пат. 2534183 Российская Федерация, МПК⁷ В 23 К 15/00, В 23 К 103/18. Способ электронно-лучевой сварки разнородных металлических материа-

лов / Драгунов В. К., Слива А. П., Гончаров А. Л., Чепурин М. В. № 2013125682/02 ; заявл. 04.06.2013 ; опубл. 27.11.2014, Бюл. № 33. 9 с.

15. Андреев А. Д., Черных Л. М. Физика. Магнетизм : конспект лекций. СПб. : ГОУВПО СПбГУТ, 2009. 56 с.

16. Глазер В. Основы электронной оптики. М. : Техтеориздат, 1957. 764 с.

17. Blakeley P. J, Sanderson A. The Origin and Effects of magnetic Fields in Electron Beam Welding // Welding Journal. 1984. Vol. 63. P. 42–49.

© Druzhinina A. A., Laptenok V. D.,
Laptenok P. V., Murygin A. V., 2017

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СЛОЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ SH-ВОЛН В СТРУКТУРАХ ME/ZNO/ME/АЛМАЗ И ME/ALN/ME/АЛМАЗ

О. П. Золотова^{1*}, С. И. Бурков²

¹Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

²Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

*E-mail: zolotova@sibsau.ru

С помощью компьютерного моделирования проанализировано влияние массовой нагрузки в виде двух металлических слоев на изменение фазовой скорости дисперсионных поперечных мод упругой волны в структурах Me/ZnO/Me/алмаз и Me/AlN/Me/алмаз в зависимости от частоты волны и отношения толщин слоев «металл–пьезоэлектрик». Материалы пьезоэлектрических слоев и подложки обладают набором таких значимых свойств, как большие значения коэффициента электромеханической связи у пьезоэлектриков и значительные величины фазовых скоростей объемных волн и поверхностной акустической волны в алмазе. В качестве материалов металлического слоя использовались алюминий (Al), молибден (Mo) и платина (Pt), наиболее часто применяющиеся при изготовлении акустоэлектронных устройств. Обнаружено, что изменение фазовой скорости упругой волны зависит от акустического импеданса металлического слоя и его толщины. При низких значениях акустического импеданса металлического слоя более существенные изменения величин $\Delta v/v$ происходят вследствие изменения толщины нижнего электрода. Однако если акустический импеданс металлического слоя сравним с акустическим импедансом подложки, то увеличение значения величин $\Delta v/v$ в большей степени обусловлено толщиной верхнего металлического слоя. Результаты выполненного моделирования могут быть использованы при разработке различных акустоэлектронных устройств, в том числе используемых в качестве компонентов электронной базы ракетно-космической техники.

Ключевые слова: пьезоэлектрическая слоистая структура, волна Лява, массовая нагрузка, компьютерное моделирование.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 3, P. 642–650

METAL LAYER THICKNESS INFLUENCE ON THE DISPERSION CHARACTERISTICS OF SH-WAVES IN THE STRUCTURES “ME/ZNO/ME/DIAMOND” AND “ME/ALN/ME/DIAMOND”

O. P. Zolotova^{1*}, S. I. Burkov²

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

²Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

*E-mail: zolotova@sibsau.ru

The research paper presents the results of computer simulation of the influence of mass loading represented by two metal layers on variations in the phase velocity of the dispersion shear modes of the elastic wave in the piezoelectric layered structures Me/ZnO/Me/diamond and Me/AlN/Me/diamond depending on the frequency and the ratio of the metal layer thickness to the piezoelectric crystalline layer thickness. The materials of the piezoelectric layers and the substrate have a set of such significant properties as the large values of the electromechanical coupling coefficient for piezoelectric and the significant values of the phase velocities for bulk waves and surface acoustic wave in diamond. Aluminum (Al), molybdenum (Mo) and platinum (Pt) are considered as the metal layer materials, which are most often used in the manufacturing of acoustoelectronic devices. It was found that variation in the elastic wave phase velocity depends on the acoustic impedance of metal layer and its thickness. More significant changes in $\Delta v/v$ values at low acoustic impedance values of the metal layer occur due to a change in the thickness of the lower electrode. However, if the acoustic impedance of the metal layer is comparable with the acoustic impedance of the substrate, the increase in $\Delta v/v$ values is largely due to the thickness of the upper metal layer. The results of the simulation can be used in the development of various acoustoelectronic devices, including components of the electronic base of rocket and space technology.

Keywords: piezoelectric layered structure, Love wave, mass loading, computer simulation.

Введение. Устройства акустоэлектроники имеют ограниченные размеры, и при их разработке актуальной проблемой становится учет отражения и преломления упругой волны от границы кристаллической пластины либо от зоны контакта двух различных сред [1]. Более сложная ситуация складывается в многослойных структурах, где необходимо поочередно учитывать границы между всеми кристаллическими слоями. В данном случае может происходить трансформация типа упругого колебания либо возбуждение поверхностной волны при отражении объемной волны от межслойного интерфейса [2]. В настоящее время появилось много экспериментальных и теоретических исследований массовой чувствительности различных акустоэлектронных устройств на основе многослойных пьезоэлектрических структур, работающих на поперечных и продольной толщинных модах упругих колебаний [3–5]. В частности, существуют работы, в которых сдвиговые колебания резонаторов, созданных на подобных структурах, были использованы для разработки биосенсоров [6]. В сенсорах, созданных на основе слоистой пьезоэлектрической структуры, толщина электродов часто сопоставима с толщиной пьезоэлектрической пленки, и, следовательно, металлическими слоями нельзя пренебрегать. Тем более что такие металлы, как золото или платина, которые часто используются в сенсорах для различных биохимических применений, обладают значительными значениями акустического импеданса [7]. Однако исследования влияния массовой нагрузки пока не дают ответ на вопрос об основных причинах изменения значений фазовой скорости упругой волны в слоистой структуре. Таким образом, учет влияния толщины металлических слоев на изменение дисперсионных характеристик упругой волны в многослойной пьезоэлектрической структуре имеет ключевое значение для оптимизации конструкции и повышения чувствительности сенсоров на подобных структурах [8].

В настоящей работе выполнено компьютерное моделирование влияния массовой нагрузки в виде металлических слоев на дисперсионные характеристики мод упругой волны Лява в пьезоэлектрических слоистых структурах с оксидом цинка на алмазе (Me/ZnO/Me/алмаз) и нитридом алюминия на алмазе (Me/AlN/Me/алмаз). Данные материалы обладают набором таких свойств, как большие значения коэффициента электромеханической связи у пьезоэлектриков и значительные величины фазовых скоростей объемных волн и поверхностной акустической волны в алмазе. Благодаря этим особенностям рассматриваемые материалы широко используются при разработке различных акустоэлектронных устройств. В качестве материалов металлических слоев были выбраны алюминий, молибден, платина в виде напыленной тонкой пленки, т. е. металлы, наиболее часто применяющиеся при изготовлении электродов [9]. Результаты выполненного моделирования могут быть использованы при разработке различных акустоэлектронных устройств, в том числе используемых в качестве компонентов электронной базы ракетно-космической техники.

Теоретические основы распространения упругих волн в слоистой пьезоэлектрической среде.

Упругие волны малой амплитуды распространяются в невозмущенном внешними воздействиями пьезоэлектрическом кристалле. Уравнение движения, уравнение электростатики и уравнения состояния пьезоэлектрической среды имеют вид [10]

$$\rho_0 \ddot{U}_A = \tau_{AB,B}; \quad D_{M,M} = 0; \quad (1)$$

$$\tau_{AB} = c_{ABCD}^E \eta_{CD} - e_{MAB} E_M; \quad D_M = \varepsilon_{MN}^{\eta} E_N + e_{MAB} \eta_{AB},$$

где ρ_0 – плотность кристалла в недеформированном состоянии; U_A – вектор динамических упругих смещений; τ_{AB} – тензор термодинамических напряжений; D_M – вектор электрической индукции; η_{CD} – тензор малых деформаций; c_{ABCD}^E , e_{MAB} , ε_{MN}^{η} – упругие, пьезоэлектрические и диэлектрические постоянные второго порядка. Для упругих смещений и электрического потенциала в виде плоских монохроматических волн малой амплитуды система уравнений (1) записывается в виде уравнения Грина–Кристоффеля, которое необходимо решить для каждой используемой среды слоистой структуры [11].

Введем рабочую ортогональную систему координат, в которой ось X_3 направлена вдоль внешней нормали к поверхности слоя, а ось X_1 совпадает с направлением распространения волны (рис. 1). Распространение упругой волны в такой системе должно удовлетворять соответствующим граничным условиям. Граничными условиями, в частности для четырехслойной структуры «металл – пьезоэлектрик – металл – диэлектрическая подложка» (рис. 1, а), являются: равенство нулю нормальных компонент тензора напряжений на границе раздела «металл–вакуум»; равенство нормальных компонент тензора напряжений на границе раздела «металл–пьезоэлектрик»; равенство векторов смещения; равенство нулю волны электрического потенциала [12]:

$$\tau_{3j}^{(1)}|_{x_3=d_1} = 0;$$

$$\tau_{3j}^{(1)} = \tau_{3j}^{(2)}|_{x_3=h}; \quad \varphi^{(2)} = 0|_{x_3=h}; \quad \vec{U}^{(1)} = \vec{U}^{(2)}|_{x_3=h}; \quad (2)$$

$$\tau_{3j}^{(2)} = \tau_{3j}^{(3)}|_{x_3=d_2}; \quad \varphi^{(2)} = 0|_{x_3=d_2}; \quad \vec{U}^{(1)} = \vec{U}^{(3)}|_{x_3=d_2};$$

$$\tau_{3j}^{(3)} = \tau_{3j}^{(4)}|_{x_3=0}; \quad \vec{U}^{(3)} = \vec{U}^{(4)}|_{x_3=0},$$

где d_1 , d_2 и h – толщины верхнего, нижнего слоя металла и пьезоэлектрического слоя соответственно. В настоящей работе рассмотрен случай, когда $d_1 = d_2$, т. е. толщины верхнего и нижнего слоев металла равны.

Подставляя в граничные условия уравнения упругой волны в виде линейных комбинаций парциальных волн

$$U_i = \sum_n C_n^{(m)} \alpha_i^{(n)} \exp[i(k_1 x_1 + k_3^{(n)} x_3 - \omega t)], \quad (3)$$

$$\varphi = \sum_n C_4^{(m)} \alpha_4^{(n)} \exp[i(k_1 x_1 + k_3^{(n)} x_3 - \omega t)],$$

где верхний индекс n соответствует числу парциальных волн в соответствующем кристаллическом слое, получим систему уравнений – граничных условий. Равенство нулю определителя матрицы граничных условий (2), размерность которой в данном случае

равна 24×24 , позволяет определить характеристики упругой волны.

Вариации граничных условий (2) определяют все типы упругих волн, распространяющихся в слоистой структуре. Для рассматриваемых слоистых структур Me/ZnO/Me/алмаз и Me/AlN/Me/алмаз система уравнений граничных условий (2) разделяется на две независимые части: систему уравнений 16×16 для рэлеевских мод и систему уравнений 8×8 для SH -мод упругой волны. При использовании в слоистой структуре изотропных металлов, пьезоэлектрика группы симметрии 6 мм и диэлектрической подложки из кубического кристалла система уравнений для мод упругой волны Лява запишется в виде

$$\begin{aligned} C_n^{(1)} k_3^{(n)} \alpha_2^{(n)} \exp[ik_3^{(n)} d_1] &= 0, \\ C_n^{(1)} C_{44}^{(1)} k_3^{(n)} \alpha_2^{(n)} \exp[ik_3^{(n)} h] - \\ - C_n^{(2)} C_{44}^{(2)} k_3^{(m)} \alpha_2^{(m)} \exp[ik_3^{(m)} h] &= 0, \\ C_n^{(2)} C_{44}^{(2)} k_3^{(n)} \alpha_2^{(n)} \exp[ik_3^{(n)} d_2] - \\ - C_n^{(3)} C_{44}^{(3)} k_3^{(m)} \alpha_2^{(m)} \exp[ik_3^{(m)} d_2] &= 0, \\ C_m^{(1)} \alpha_2^{(m)} \exp[ik_3^{(m)} h] - C_n^{(2)} \alpha_2^{(n)} \exp[ik_3^{(n)} h] &= 0, \\ C_m^{(3)} \alpha_2^{(m)} \exp[ik_3^{(m)} d_2] - C_n^{(2)} \alpha_2^{(n)} \exp[ik_3^{(n)} d_2] &= 0, \\ C_n^{(3)} C_{44}^{(3)} k_3^{(n)} \alpha_2^{(n)} - C_n^{(4)} C_{44}^{(4)} k_3^{(n)} \alpha_2^{(n)} &= 0, \\ C_m^{(3)} \alpha_2^{(m)} - C_n^{(4)} \alpha_2^{(n)} &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где цифровые верхние индексы 1–4 обозначают слои и подложку соответственно, по аналогии с уравнением (2); k_3 – волновой вектор.

Анализ влияния массовой нагрузки в слоистой структуре. Массовая чувствительность S многослойного резонатора определяется из условия энергетического баланса как частотное изменение, т. е. сдвиг относительной частоты резонатора, нормализованный к поверхностной массовой плотности [13]:

$$S = \left(\frac{\Delta f}{f_0} \right) / (f \rho_s) = \left(\frac{\Delta v}{v} \right) / (f \rho_s), \quad (5)$$

где v , f – фазовая скорость и частота упругой волны. Однако недостатком данного подхода является то, что при больших значениях частоты f сглаживаются изменения фазовой скорости при увеличении толщины металлического слоя. Поэтому в настоящей работе для определения массовой чувствительности упругой волны использовалась следующая формула:

$$S_v = \frac{\Delta v}{v} = \frac{v_{mt} - v}{v_{mt}}, \quad (6)$$

где v_{mt} – фазовая скорость упругой волны при нанесении тонкого металлического слоя, не изменяющего механических граничных условий. Отметим, что данное условие, как показал компьютерный эксперимент, выполняется при толщине слоя менее 1 нм. Также условие (6) нивелирует влияние пьезоэффекта, и, следовательно, параметр S_v не будет зависеть от типа пьезоэлектрического слоя.

Схематическое изображение исследуемых слоистых структур представлено на рис. 1, а. Дисперсионные

зависимости фазовых скоростей фундаментальной и первой моды волны Лява от значения параметра $h \times f$ (толщина пьезоэлектрика $\times$ частота) для слоистой структуры вида Me/ZnO/Me/алмаз с ориентацией [100] (001) слоя и подложки представлены на рис. 1, б, аналогичные зависимости для слоистой структуры вида Me/AlN/Me/алмаз с ориентацией [100] (001) слоя и подложки представлены на рис. 1, в. В качестве слоя металла (Me) использовались Al, Mo, Pt, обладающие различными значениями акустического импеданса $Z = \rho v$. Выбор различных металлов позволяет также выяснить, как высокий/низкий акустический импеданс слоя влияет на изменение фазовой скорости упругой волны. Акустические импедансы используемых слоев соотносятся как $Z_{Al} < Z_{AlN} < Z_{ZnO} < Z_{алмаз} < Z_{Mo} < Z_{Pt}$. Значения материальных констант используемых материалов для алюминия и молибдена взяты в [9], ZnO – в [14], AlN – в [15], алмаза – в [16], поликристаллической платины – в [17].

Диапазон изменения фазовых скоростей SH -мод упругой волны в структуре Me/ZnO/Me/алмаз находится в пределах от значения фазовой скорости сдвиговой волны алмаза ($v = 12828,2$ м/с) до фазовой скорости поперечно-поляризованной объемной сдвиговой волны в ZnO ($v = 4176,2$ м/с).

В структуре Me/AlN/Me/алмаз фазовые скорости SH -мод упругой волны изменяются также от значения фазовой скорости сдвиговой волны алмаза до фазовой скорости медленной поперечно-поляризованной объемной сдвиговой волны в AlN ($v = 5808,8$ м/с).

Расчет изменения мод фазовых скоростей упругой волны был произведен при относительных отношениях толщин металлических слоев к толщине пьезоэлектрика $d/h = 0,005; 0,01; 0,05; 0,1$. Сплошной линией на рис. 1, б, в обозначены фазовые скорости мод упругой волны Лява (SH -моды) при металлизации пьезоэлектрического слоя двумя бесконечно тонкими слоями металла, не нарушающими механических граничных условий. Штриховыми линиями на рис. 1, б, в обозначены фазовые скорости упругой волны при относительном отношении толщины слоя металла к слою пьезоэлектрика $d/h = 0,1$. В абсолютных значениях представленные значения фазовых скоростей можно представить при толщинах слоев пьезоэлектрика $h = 10$ мкм и металла $d = 1$ мкм при изменении частоты от 1 МГц до 1 ГГц.

Использование слоев металла в слоистой структуре может существенно повлиять на перераспределение упругой энергии волны вследствие акустических свойств самих слоев или сложной интерференции между модами упругой волны, падающими и отраженными от границы раздела слоев. Например, в структурах Pt/ZnO/Pt/алмаз и Pt/AlN/Pt/алмаз при увеличении значений $h \times f$ фазовые скорости SH -мод (волны Лява) упругой волны стремятся к значению фазовой скорости объемной сдвиговой волны в Pt. Аналогичная ситуация проявляется и при использовании в многослойной структуре других металлов. При этом отмечается, что в структуре Me/AlN/Me/алмаз скорости SH -мод упругой волны при одинаковом типе металла и значении параметра $h \times f$ уменьшаются более значительно, чем в структуре Me/ZnO/Me/алмаз.

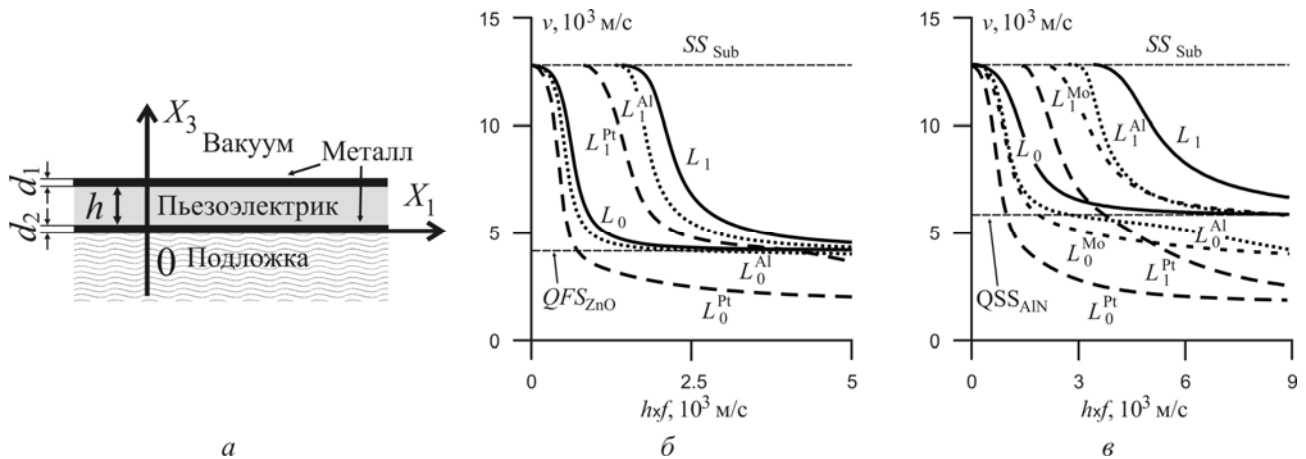


Рис. 1. Дисперсионные зависимости фазовых скоростей от произведения $h \times f$ для слоистой структуры Ме/пьезоэлектрик/Ме/алмаз: а – схема слоистой структуры; б – моды SH -волны L_0 и L_1 в структуре Ме/ ZnO /Ме/алмаз; в – моды SH -волны L_0 и L_1 в структуре Ме/ AlN /Ме/алмаз; сплошные линии – скорости мод при бесконечно тонких слоях металла, штриховые линии – скорости при толщине слоев металла $d/h = 0,1$

Fig. 1. Dispersive dependence of phase velocities on the product $h \times f$ for the layered structure Me/Piezoelectric /Me/diamond: a – the scheme of the layered structure; b – SH -wave mode L_0 and L_1 in the structure Me/ ZnO /Me/diamond; c – SH -wave mode L_0 and L_1 in the structure Me/ AlN /Me/diamond. Solid lines – mode velocities for infinitely thin metal layers, dash lines – mode velocities for metal layers thickness $d/h = 0,1$

На рис. 2 представлены графики относительного изменения фазовых скоростей S_v (б) фундаментальной моды L_0 и первой моды L_1 волны Лява в зависимости от типа металлического слоя, отношения d/h и параметра $h \times f$ в структуре Ме/ ZnO /Ме/алмаз. Максимальные значения параметра S_v моды L_0 достигаются при значении $h \times f = 600\text{--}700$ м/с при использовании всех типов металлических слоев и отношении $d/h = 0,1$ (рис. 2, а–в). При использовании слоев Al и Mo значения параметра $S_v = 0,24$ и $S_v = 0,26$ соответственно, но для структуры Pt/ ZnO /Pt/алмаз параметр $S_v = 0,49$. Необходимо отметить, что увеличение толщины металлического слоя приводит к смещению частоты сигнала при достижении максимальных значений параметра S_v . Существенный рост значений параметра S_v особенно проявляется с ростом значений $h \times f$ при отношении $d/h > 0,05$. Данное увеличение значений S_v особенно существенно для металлов с высоким значением акустического импеданса для фундаментальной моды L_0 упругой волны. Однако численные значения S_v в зависимости от типа металла существенно отличаются, например, в структуре Al/ ZnO /Al/алмаз $S_v = 0,11$ при $h \times f = 8500$ м/с, а в структуре Pt/ ZnO /Pt/алмаз $S_v = 0,56$ при аналогичном значении $h \times f$.

Максимальные значения параметра S_v для моды L_1 упругой волны Лява достигаются при $h \times f = 2100$ м/с, где выполняется условие $h = \lambda/4$, т. е. толщина пьезоэлектрического слоя равна четверти длины упругой волны (рис. 2, з–е). Однако в отличие от фундаментальной моды L_0 для первой моды L_1 волны Лява величины параметра S_v с ростом значений $h \times f$ уменьшаются при использовании металлических слоев Al или Mo, но для структуры Pt/ ZnO /Pt/алмаз при отношении $d/h = 0,1$ происходит резкий рост значений параметра S_v (рис. 2, е).

На рис. 3 представлены графики относительного изменения фазовых скоростей S_v фундаментальной и первой моды волны Лява в зависимости от типа металлического слоя, отношения d/h и параметра $h \times f$ в структуре Ме/ AlN /Ме/алмаз.

Максимальные значения параметра S_v моды L_0 достигаются при значениях $h \times f = 1300\text{--}1400$ м/с при использовании всех типов металлических слоев и отношении $d/h = 0,1$ (рис. 3, а–в). При использовании слоев Al и Mo значения параметра $S_v = 0,27$ и $S_v = 0,31$ соответственно, а для структуры Pt/ AlN /Pt/алмаз параметр $S_v = 0,55$. Значения параметра S_v на 12–13 % превышают аналогичные значения для структуры Ме/ ZnO /Ме/алмаз, при этом увеличение толщины металлического слоя также приводит к смещению частоты сигнала при достижении максимальных значений параметра S_v . При этом в отличие от предыдущей структуры для фундаментальной моды L_0 упругой волны отмечено существенное увеличение значений параметра S_v для всех типов металлов при отношении $d/h > 0,05$. Величина параметра S_v при больших значениях $h \times f$ может быть сравнима или даже превышать значения в локальном максимуме при $h \times f = 1300\text{--}1400$ м/с. Например, в структуре Al/ AlN /Al/алмаз $S_v = 0,26$ при $h \times f = 8500$ м/с, а в структуре Pt/ AlN /Pt/алмаз $S_v = 0,73$ при аналогичном значении $h \times f$.

Максимальные значения параметра S_v для моды L_1 упругой волны Лява достигаются при $h \times f = 4300$ м/с, где выполняется условие $h = \lambda/4$, т. е. толщина пьезоэлектрического слоя равна четверти длины упругой волны (рис. 3, з–е). В целом характер изменений параметра S_v аналогичен изменениям S_v в предыдущей слоистой структуре.

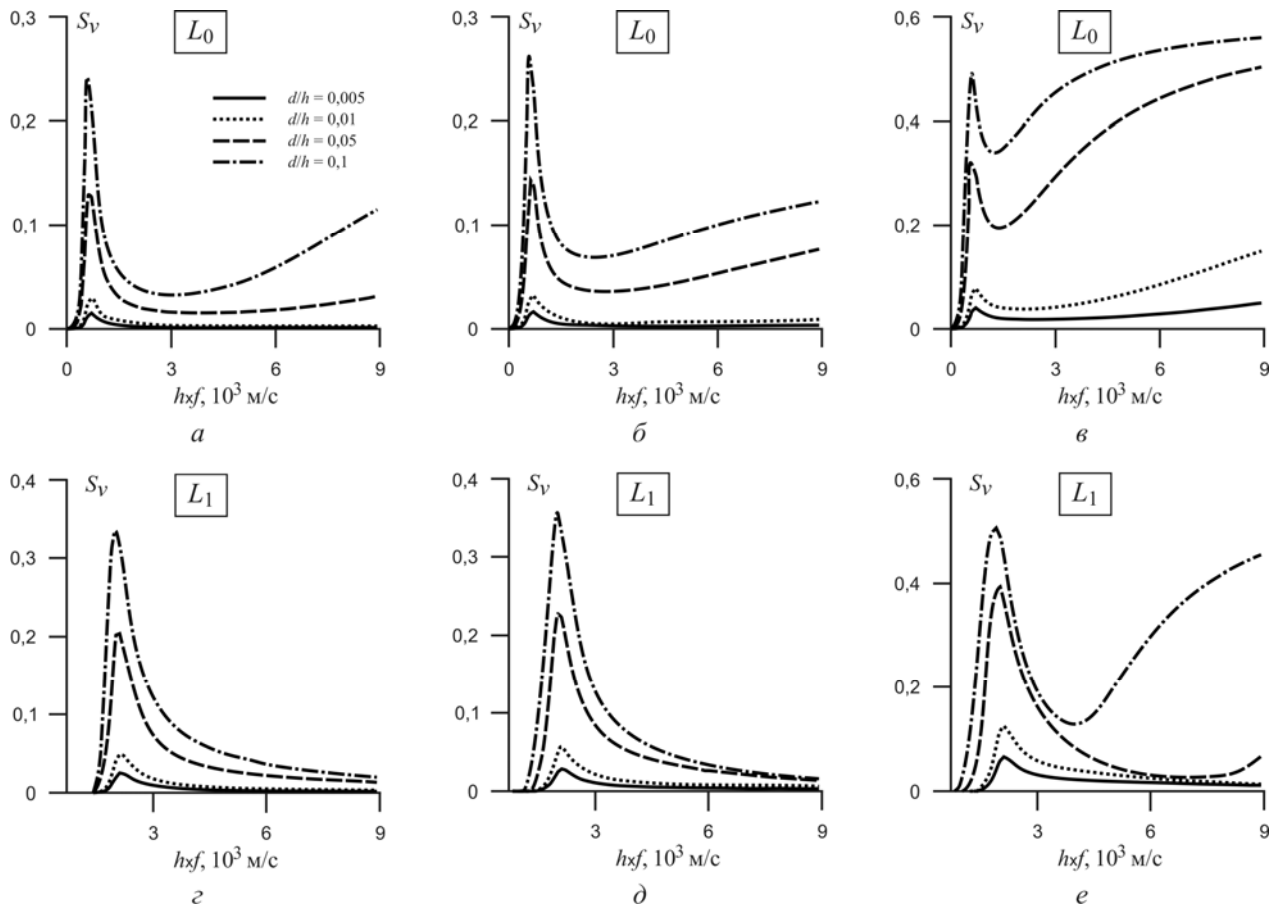


Рис. 2. Дисперсионные зависимости изменения фазовых скоростей моды L_0 и L_1 от произведения $h \times f$ для слоистой структуры Me/ZnO/Me/алмаз: а, з – алюминий; б, д – молибден; в, е – платина; отношение толщин металла и пьезоэлектрика d/h : 0,005; 0,01; 0,05; 0,1

Fig. 2. Dispersive dependence of the change of phase velocities of the mode L_0 and L_1 on the product of $h \times f$ for the layered structure Me/ZnO/Me/diamond: а (а), d (z) – aluminium; б (b), e (d) – molybdenum; в (c), f (e) – platinum. Ratio of the metal layers and piezoelectric d/h : 0,005; 0,01; 0,05; 0,1

При создании устройств акустоэлектроники желательно представлять характер зависимости характеристик упругой волны от свойств дополнительных слоев. На рис. 4 представлены зависимости параметра S_v от величины значения d/h для фундаментальных и первых мод упругой волны в обеих слоистых структурах.

В случае рассмотрения структуры Me/ZnO/Me/алмаз линейная зависимость наблюдается только при использовании слоев Al (рис. 4, а). Например, для фундаментальной моды L_0 волны Лява при $h \times f = 700$ м/с и первой моды L_1 при $h \times f = 3400$ м/с зависимость S_v от величины значения d/h аппроксимируется выражением $S_v = 2,2 \cdot d/h$ и $S_v = 0,94 \cdot d/h$ соответственно. Однако уже для структуры Mo/ZnO/Mo/алмаз наблюдается квадратичная зависимость $S_v = -9,3 \cdot (d/h)^2 + 3,2 \cdot d/h$ для фундаментальной моды L_0 и $S_v = -6,4 \cdot (d/h)^2 + 1,6 \cdot d/h$ для моды L_1 . При использовании слоев платины присутствует явно выраженная квадратичная зависимость $S_v = -30,6 \cdot (d/h)^2 + 7,5 \cdot d/h$ для фундаментальной моды L_0 и $S_v = -17,4 \cdot (d/h)^2 + 3,1 \cdot d/h$ для моды L_1 . При этом наблюдаются максимальные величины параметра S_v для фундаментальной моды волны Лява при отношении $d/h = 0,1$. В целом в рассмотренной структуре мода L_0 обладает большей чувствительностью при всех типах металлов, чем первая мода волны Лява.

В случае рассмотрения упругих волн Лява в структуре Me/AlN/Me/алмаз линейная зависимость уже не наблюдается (рис. 4, б). Например, для фундаментальной моды L_0 волны Лява при $h \times f = 1300$ м/с и первой моды L_1 при $h \times f = 4400$ м/с зависимость S_v от величины значения d/h аппроксимируется выражением $S_v = -9,6 \cdot (d/h)^2 + 3,7 \cdot d/h$ и $S_v = -17,5 \cdot (d/h)^2 + 5,4 \cdot d/h$ соответственно. При использовании слоев платины присутствует явно выраженная квадратичная зависимость: $S_v = -35 \cdot (d/h)^2 + 9 \cdot d/h$ для фундаментальной моды L_0 и $S_v = -48,6 \cdot (d/h)^2 + 10,7 \cdot d/h$ для моды L_1 . При этом максимальные величины параметра S_v наблюдаются для первой моды волны Лява при отношении $d/h = 0,1$. В отличие от предыдущей структуры, мода L_1 обладает большей чувствительностью при всех типах металлов, чем фундаментальная мода волны Лява.

Необходимо отметить, что подобные зависимости параметра S_v прослеживаются на всем рассмотренном частотном интервале. Таким образом, в многослойных структурах Me/ZnO/Me/алмаз и Me/AlN/Me/алмаз чувствительность S_v находится в прямой зависимости от значения акустического импеданса металлического слоя.

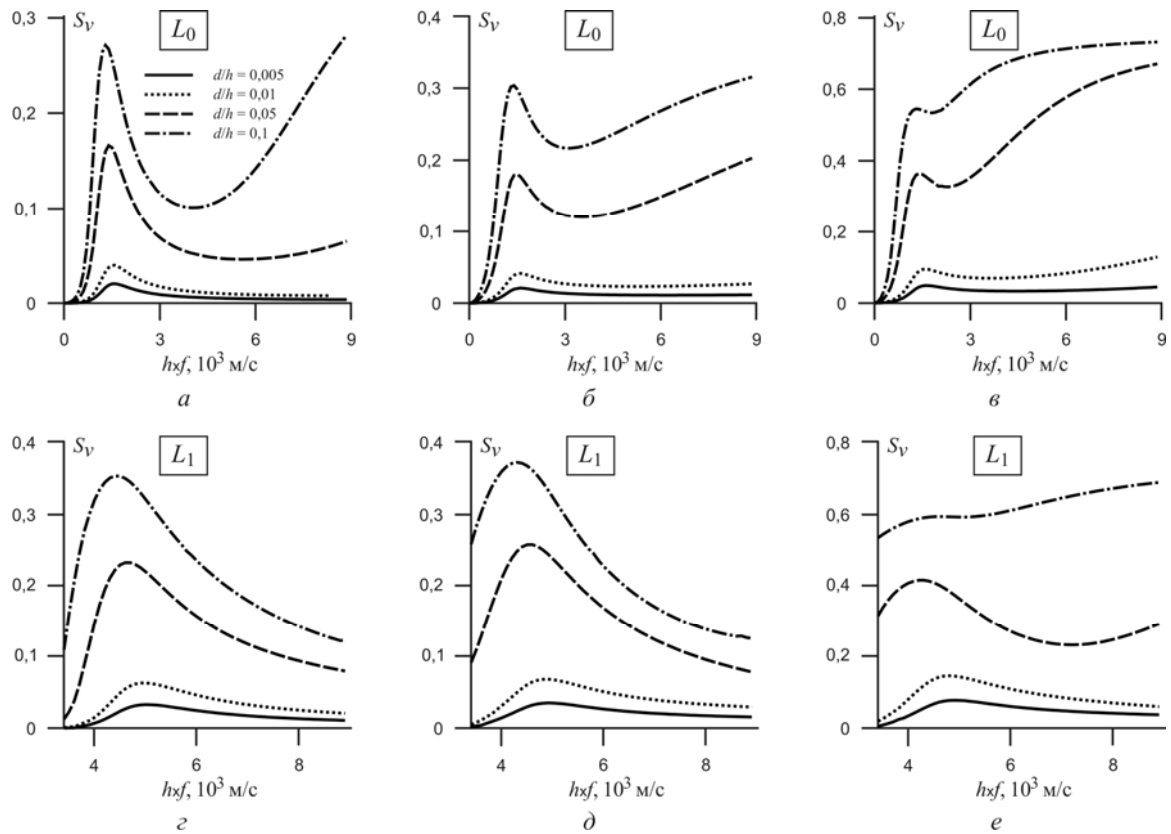


Рис. 3. Дисперсионные зависимости изменения фазовых скоростей моды L_0 и L_1 от произведения $h \times f$ для слоистой структуры Me/AlN/Me/алмаз: а, з – алюминий; б, д – молибден; в, е – платина; отношение толщин металла и пьезоэлектрика d/h : 0,005; 0,01; 0,05; 0,1

Fig. 3. Dispersive dependence of the change of phase velocities of the mode L_0 and L_1 on the product of $h \times f$ for the layered structure Me/AlN/Me/diamond: а (a), d (z) – aluminium; б (b), e (d) – molybdenum; в (v), f (e) – platinum. Ratio of the metal layers and piezoelectric d/h : 0,005; 0,01; 0,05; 0,1

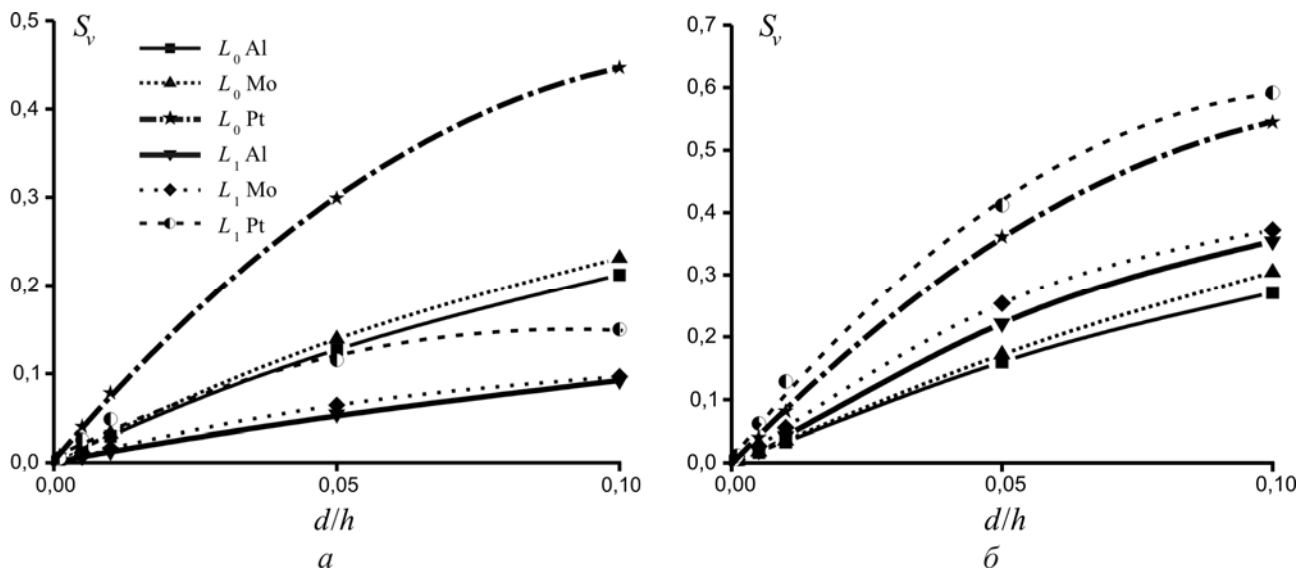


Рис. 4. Графики зависимости S_v отношения от толщины металла: а – структура Me/ZnO/Me/алмаз, мода L_0 при $h \times f = 700$ м/с и мода L_1 при $h \times f = 3400$ м/с; б – структура Me/AlN/Me/алмаз, мода L_0 при $h \times f = 1300$ м/с и мода L_1 при $h \times f = 4400$ м/с

Fig. 4. Dependency Graphs of the dependency of S_v ratio on the metal thickness: а – the structure Me/ZnO/Me/diamond, mode L_0 of $h \times f = 700$ m/c and mode L_1 of $h \times f = 3400$ m/c; б – the structure Me/AlN/Me/diamond, mode L_0 of $h \times f = 1300$ m/c and mode L_1 of $h \times f = 4400$ m/c

При рассмотрении условий распространения упругой волны в пьезоэлектрической структуре типа Ме/пьезоэлектрик/Ме/алмаз возникает следующий вопрос: каким образом верхний или нижний металлический слой влияет на изменение фазовой скорости волны? Установлено, что для геометрически несимметричной многослойной структуры, когда толщины металлических слоев и/или типы материалов варьируются, значения параметра S_V будут отличаться.

На рис. 5 представлены дисперсионные зависимости фундаментальной моды L_0 волны Лява от величины параметра $h \times f$ в структурах Ме/ZnO/алмаз и ZnO/Ме/алмаз. В структуре Ме/ZnO/алмаз характер изменения параметра S_V при использовании различных металлов качественно подобен поведению параметра S_V в структуре Ме/ZnO/Ме/алмаз. Однако отмечено, что если в структурах Al/ZnO/Al/алмаз и Mo/ZnO/Mo/алмаз величины параметра S_V сравнимы (см. рис. 2, а, б), то для структур Al/ZnO/алмаз и Mo/ZnO/алмаз значения параметра S_V существенно отличаются (рис. 5, а, б). В частности, при использовании Al при значении $h \times f = 700$ м/с и $d/h = 0,1$ значение параметра $S_V = 0,075$, а при использовании Mo величина $S_V = 0,21$. Для структур Pt/ZnO/Pt/алмаз и Pt/ZnO/алмаз характер поведения и значения параметра S_V практически не меняются (рис. 2, в, рис. 5, в).

В структурах ZnO/Ме/алмаз характер поведения дисперсии параметра S_V моды L_0 меняется: высокие значения чувствительности сменяются низкими, и наоборот. Например, при использовании слоя Al при значении $h \times f = 700$ м/с и $d/h = 0,1$ параметр $S_V = 0,18$, для Mo $S_V = 0,06$, и для Pt $S_V = 0,12$.

На рис. 6 представлены дисперсионные зависимости фундаментальной моды L_0 волны Лява в структурах Ме/AlN/алмаз и AlN/Ме/алмаз. В структуре Ме/AlN/алмаз характер изменения параметра S_V при использовании различных металлов качественно подобен поведению параметра S_V в структуре Ме/AlN/Ме/алмаз. Аналогично рассмотренному предыдущему случаю с несимметричной металлизацией структур ZnO/алмаз в структурах Al/AlN/Al/алмаз и Mo/AlN/Mo/алмаз величины параметра S_V сравнимы (см. рис. 3, а, б), а для структур Al/AlN/алмаз и Mo/AlN/алмаз значения параметра S_V существенно отличаются (см. рис. 6, а, б). В частности, при использовании Al при значении $h \times f = 1600$ м/с и $d/h = 0,1$ значение параметра $S_V = 0,09$, а при использовании Mo величина $S_V = 0,26$. Для структур Pt/AlN/Pt/алмаз и Pt/AlN/алмаз характер поведения и значения параметра S_V практически не меняются (см. рис. 3, в, рис. 6, в).

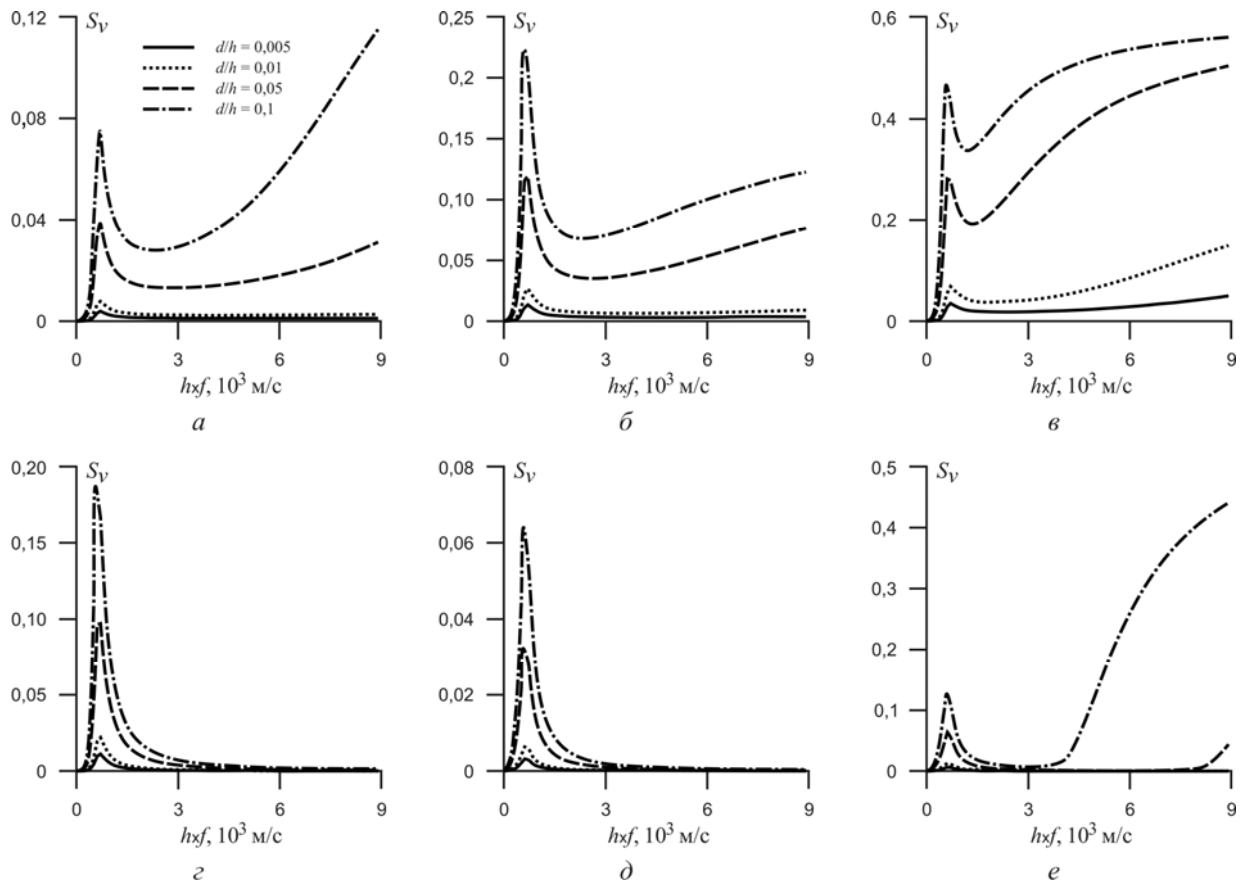


Рис. 5. Дисперсионные зависимости изменения фазовых скоростей моды L_0 от произведения $h \times f$ для слоистой структуры Ме/ZnO/алмаз (а-в) и ZnO/Ме/алмаз (г-е): а, г – алюминий, б, д – молибден, в, е – платина; отношение толщин металла и пьезоэлектрика d/h : 0,005; 0,01; 0,05; 0,1

Fig. 5. Dispersive dependence of the change of phase velocities of the mode L_0 on the product of $h \times f$ for the layered structure Ме/ ZnO /Ме/diamond (а-в) and ZnO/Ме/diamond (г-е): а (а), д (г) – aluminium; б (б), е (д) – molybdenum; в (в), ф (е) – platinum. Ratio of the metal layers and piezoelectric d/h : 0,005; 0,01; 0,05; 0,1

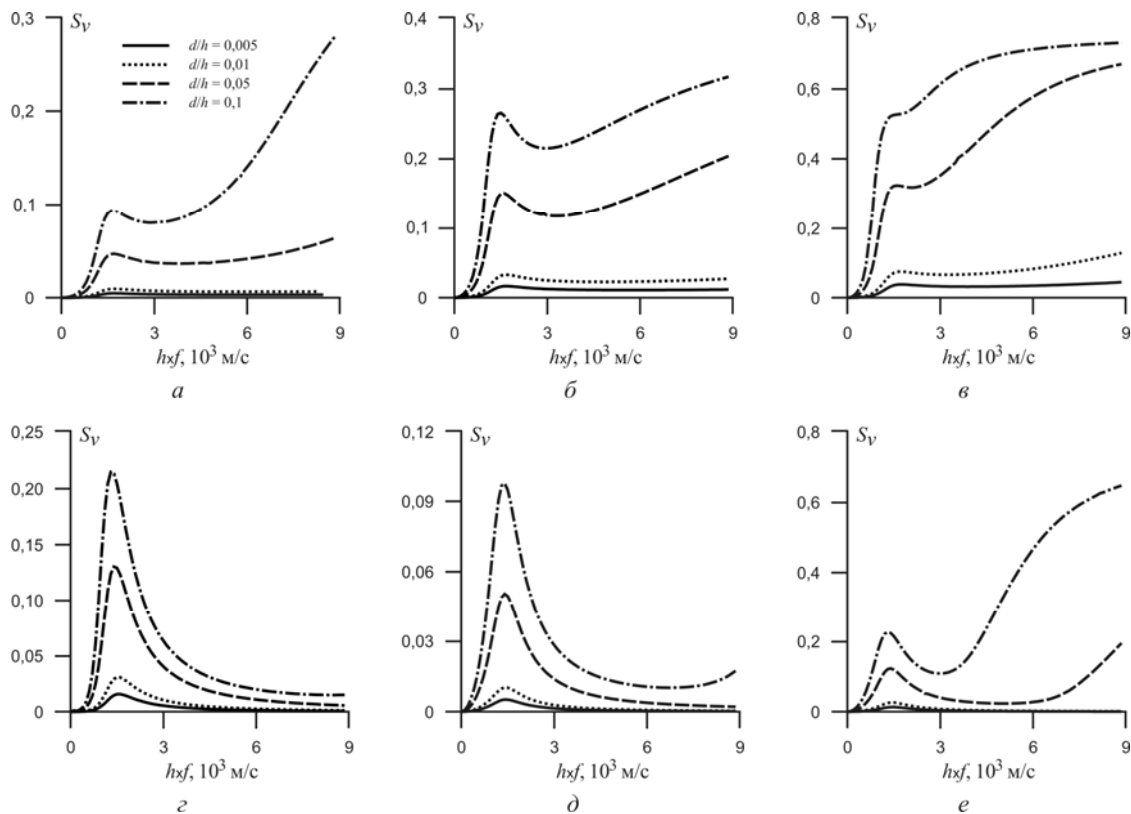


Рис. 6. Дисперсионные зависимости изменения фазовых скоростей моды L_0 от произведения $h \times f$ для слоистой структуры Me/AlN/алмаз (а-в) и AlN/Me/алмаз (г-е): а, г – алюминий; б, д – молибден; в, е – платина; отношение толщин металла и пьезоэлектрика d/h : 0,005; 0,01; 0,05; 0,1

Fig. 6. Dispersive dependence of the change of phase velocities of the mode L_0 on the product of $h \times f$ for the layered structure Me/ AlN /Me/diamond (a-e) and AlN /Me/diamond (z-e): a (a), d (z) – aluminium; b (б), e (д) – molybdenum; c (в), f (е) – platinum. Ratio of the metal layers and piezoelectric d/h : 0,005; 0,01; 0,05; 0,1

В структурах AlN/Me/алмаз характер поведения дисперсии параметра S_v моды L_0 также меняется: высокие значения чувствительности сменяются низкими, и наоборот. Например, при использовании слоя Al при значении $h \times f = 1300$ м/с и $d/h = 0,1$ параметр $S_v = 0,22$, для Mo $S_v = 0,097$, и для Pt $S_v = 0,23$.

Таким образом, в обоих типах структур с несимметричной металлизацией при высоких значениях акустического импеданса металлического слоя максимальные значения чувствительности достигаются при наличии верхнего металлического слоя, т. е. в структуре Me/ZnO/алмаз и Me/AlN/алмаз, а при низких значениях акустического импеданса – в структурах при наличии промежуточного металлического слоя (ZnO/Me/алмаз и AlN/Me/алмаз).

Заключение. Влияние массовой нагрузки в виде двух металлических слоев (моделирующих верхний и нижний электрод) на изменение фазовой скорости $\Delta v/v$ дисперсионных мод упругой волны в пьезоэлектрических слоистых структурах Me/ZnO/Me/алмаз и Me/AlN/Me/алмаз в зависимости от частоты и отношения d/h находится в прямой зависимости от значения акустического импеданса металлического слоя. Отмечено, что максимальные значения изменения фазовых скоростей мод упругой волны $\Delta v/v$ достигаются при конфигурации слоистой системы Pt/AlN/Pt/алмаз. Кроме того, структуры Me/AlN/Me/алмаз обладают большим значениями чувствительности S_v , чем струк-

туры Me/ZnO/Me/алмаз. Обнаружено, что максимальные значения величин $\Delta v/v$ достигаются, если толщина металлического слоя кратна четверти длины упругой волны. Необходимо отметить, что при низких значениях акустического импеданса металлического слоя более существенные изменения величин $\Delta v/v$ происходят вследствие изменения толщины нижнего электрода. Однако если акустический импеданс металлического слоя сравним с акустическим импедансом подложки, то в данном случае увеличение значений величин $\Delta v/v$ в большей степени обусловлено толщиной верхнего металлического слоя.

Полученные результаты могут быть полезными при разработке управляемых акустоэлектронных устройств на волнах Рэлея и Лява.

Библиографические ссылки

1. Гуляев Ю. В. Акустоэлектроника (исторический обзор) // Успехи физических наук. 2005. № 8 (175). С. 887–895.
2. Альшиц В. И., Любимов В. Н., Радович А. Резонансное возбуждение волн Лява в структурах типа «сэндвич» // Физика твердого тела. 1996. № 4 (38). С. 1091–1099.
3. Thin aluminum nitride film resonators. Miniaturized high sensitivity mass sensors / R. P. O'Toole [et al.] // Analytical Chemistry. 1992. Vol. 64. P. 1289–1294.

4. Rey-Mermet S., Lanz R., Muralt P. Bulk acoustic wave resonator operating at 8GHz for gravimetric sensing of organic films // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2006. Vol. 114. P. 681–686.
5. First results on label-free detection of DNA and protein molecules using a novel integrated sensor technology based on gravimetric detection principles / R. Gabl [et al.] // *Biosensors and Bioelectronics*. 2004. Vol. 19. P. 615–620.
6. Immunosensor utilizing a shear mode thin film bulk acoustic sensor / G. Wingqvist [et. al.] // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2007. Vol. 127. P. 248–252.
7. Nakamoto T., Moriizumi T. A theory of a quartz crystal microbalance based upon a Mason equivalent circuit // *Japanese Journal of Applied Physics*. 1990. P. 1, vol. 29. P. 963–969.
8. Lamb waves dispersion curves for diamond based piezoelectric layered structure / B. P. Sorokin [et. al.] // *Applied Physics Letters*. 2016. Vol. 108. P. 113501 (5).
9. Mansfeld G. D., Alekseev S. G., Kotelyansky I. M. Acoustic HBAR spectroscopy of metal (W, Ti, Mo, Al) thin films // *Proceeding IEEE Ultrasonics Symposium (7–10 Oct. 2001, Atlanta, USA)*. 2001. Vol. 1. P. 415–418.
10. Фарнелл Д. Типы и свойства поверхностных акустических волн // *Поверхностные акустические волны / под ред. А. Олинера. М. : Мир, 1981. 500 с.*
11. Упругие волны в пьезоэлектрических слоистых структурах / О. П. Золотова [и др.] // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Математика и физика»*. 2012. № 2 (5). С. 164–186.
12. Piezoelectric-layered structures based on synthetic diamond / B. P. Sorokin [et. al.] // *InTech: Piezoelectric Materials*. 2016. P. 161–199.
13. Гравиметрическая чувствительность акустических волн в тонких пьезоэлектрических пластинах в присутствии жидкости / И. Е. Кузнецова [и др.] // *Письма в ЖТФ*. 2006. № 16 (32). С. 84–89.
14. Zhang Z., Wen Z., Wang C. Investigation of surface acoustic waves propagating in ZnO–SiO₂–Si multi-layer structure // *Ultrasonics*. 2013. Vol. 53. P. 363–368.
15. Tsubouchi K., Sugai K., Mikoshiba N. AlN material constants evaluation and SAW properties on AlN/Al₂O₃ and AlN/Si // *Proceeding IEEE Ultrasonics Symposium (14–16 Oct. 1981, Chicago, USA)*. 1981. P. 375–380.
16. Experimental investigation of the linear and nonlinear elastic properties of synthetic diamond single crystal / B. P. Sorokin [et. al.] // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Математика и физика»*. 2013. № 1(6). С. 120–126.
17. Macfarlane R. E., Rayne J. A., Jones C. K. Anomalous temperature dependence of shear modulus C_{44} for platinum // *Physics Letters*. 1965. Vol. 18. P. 91–92.
4. Rey-Mermet S., Lanz R., Muralt P. Bulk acoustic wave resonator operating at 8 GHz for gravimetric sensing of organic films. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2006, Vol. 114, P. 681–686. DOI: 10.1016/j.snb.2005.04.047.
5. Gabl R., Feucht H. D., Zeininger H. et al. First results on label-free detection of DNA and protein molecules using a novel integrated sensor technology based on gravimetric detection principles. *Biosensors and Bioelectronics*. 2004, Vol. 19, P. 615–620. DOI: 10.1016/S0956-5663(03)00259-8.
6. Wingqvist G., Bjurström J., Hellgren A. C., Katardjiev I. Immunosensor utilizing a shear mode thin film bulk acoustic sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2007, Vol. 127, P. 248–252. DOI: 10.1016/j.snb.2007.07.051.
7. Nakamoto T., Moriizumi T. A theory of a quartz crystal microbalance based upon a Mason equivalent circuit. *Japanese Journal of Applied Physics. Part 1*. 1990, Vol. 29, P. 963–969. DOI: 10.1143/JJAP.29.963.
8. Sorokin B. P., Kvashnin G. M., Telichko A. V. et al. Lamb waves dispersion curves for diamond based piezoelectric layered structure. *Applied Physics Letters*. 2016, Vol. 108, P. 113501 (5). DOI: 10.1063/1.4943945.
9. Mansfeld G. D., Alekseev S. G., Kotelyansky I. M. [Acoustic HBAR Spectroscopy of Metal (W, Ti, Mo, Al) Thin Films]. *Proc. IEEE Ultrason. Symp.* Atlanta, USA, 2001. P. 415–418. DOI: 10.1109/ULTSYM.2001.991652.
10. Farnell G. W. *Acoustic Surface Waves: Topics in Applied Physics*. Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg – New York, 1978, 390 p.
11. Zolotova O. P., Burkov S. I., Sorokin B. P., Telichko A. V. [Elastic waves in piezoelectric layered structures]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya Matematika i fizika*. 2012, Vol. 5, No. 2, P. 164–186 (In Russ.).
12. Sorokin B. P., Kvashnin G. M., Telichko A. V., Burkov S. I., Blank V. D. Piezoelectric-layered structures based on synthetic diamond. *Piezoelectric Materials*. InTech. 2016, P. 161–199. DOI: /10.5772/61563.
13. Kuznetsova I. E., Zaitsev B. D., Joshi S. G., Kuznetsova A. S. Gravimetric sensitivity of acoustic waves in thin piezoelectric plates in the presence of liquids. *Technical Physics Letters*. 2006, Vol. 32, No. 8, P. 729–731. DOI: 10.1134/S1063785006080268.
14. Zhang Z., Wen Z., Wang C. Investigation of surface acoustic waves propagating in ZnO–SiO₂–Si multi-layer structure. *Ultrasonics*. 2013, Vol. 53, No. 2, P. 363–368. DOI: 10.1016/j.ultras.2012.07.002.
15. Tsubouchi K., Sugai K., Mikoshiba N. [AlN material constants evaluation and SAW properties on AlN/Al₂O₃ and AlN/Si]. *Proc. IEEE Ultrason. Symp.* Chicago, USA, 1981. P. 375–380. DOI: 10.1109/ULTSYM.1981.197646.
16. Sorokin B. P., Kvashnin G. M., Kuznetsov M. S., Telichko A. V., Burkov S. I. Experimental investigation of the linear and nonlinear elastic properties of synthetic diamond single crystal. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya Matematika i fizika*. 2013, Vol. 6, No. 1, P. 120–126 (In Russ.).
17. Macfarlane R. E., Rayne J. A., Jones C. K. Anomalous temperature dependence of shear modulus C_{44} for platinum. *Physics Letters*. 1965, Vol. 18, No. 2, P. 91–92. DOI: 10.1016/0031-9163(65)90659-1.

References

1. Gulyaev Yu. V. Acoustoelectronics (historical review). *Physics-Uspokhi*. 2005, Vol. 48, No. 8, P. 847–855.
2. Al'shich V. I., Ljubimov V. N., Radovich A. [Resonant excitation of Love waves in the sandwich structures]. *Fizika tverdogo tela*. 1996, Vol. 38, No. 4, P. 1091–1099 (In Russ.).
3. O'Toole R. P., Burns S. C., Bastiaans G. J., Porter M. D. Thin aluminum nitride film resonators. Miniaturized high sensitivity mass sensors. *Analytical Chemistry*. 1992, Vol. 64, P. 1289–1294. DOI: 10.1021/ac00035a017.

**НАНОМОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОЛИМЕРНОГО СВЯЗУЮЩЕГО
С ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ СВОЙСТВ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**Г. Г. Крушенко^{1, 2*}, О. А. Исева²¹Институт вычислительного моделирования СО РАН

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50

²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: genry@icm.krasn.ru

Одной из проблем космического машиностроения является снижение массы деталей, узлов и механизмов как собственно космического аппарата, так и средств доставки его на орбиту, т. е. ракеты-носителя. Прогрессивным решением этой проблемы является применение так называемых сетчатых (анизогридных – anisogrid) конструкций. В настоящее время сетчатые конструкции, материалом для которых является углепластик, широко применяются в космической технике для изготовления различных пустотелых трубчатых и конических конструкций космических аппаратов. Наиболее распространенным способом изготовления углепластиковых сетчатых конструкций является их намотка из углеродных волокон. Однако при всех положительных качествах углепластиковых конструкций, в связи с однонаправленностью их структуры, их эффективное использование возможно только при одноосном нагружении, когда растягивающие и сжимающие напряжения совпадают с направлением волокон. В случае сложного сопротивления или изгиба, когда в материале возникает сложное напряженное состояние, могут произойти разрушения как от действия скалывающих касательных напряжений, так и от нормальных напряжений. Строгая ориентация волокон в одном направлении обуславливает анизотропию физико-механических свойств однонаправленных композитов. При нагрузке, приложенной нормально к направлению волокон, происходит разрушение углепластиковой конструкции практически без ее предварительной пластической деформации. Проблема повышения механических свойств углепластиковых материалов успешно решается в результате введения в полимерное связующее нанопорошков различных химических соединений. Этот процесс называется наномодифицированием. Причем в этом плане наиболее эффективным оказались углеродные нанопорошки, включая наноалмазы.

Ключевые слова: космические аппараты, снижение массы, наномодифицирование полимерного связующего.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 3, P. 651–657

**NANO MODIFICATION OF POLYMER BINDER
WITH THE AIM OF IMPROVING THE PROPERTIES OF CARBON FIBRE MATERIALS**G. G. Krushenko^{1, 2*}, O. A. Iseeva²¹Institute of Computational Modeling SB RAS

50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: genry@icm.krasn.ru

One of the problems in space engineering is the reduction of masses parts, assemblies and mechanisms as the actual spacecraft, and the means to deliver it to the orbit, i. e. booster. Progressive solution of this problem is the use of so-called net (anisogrid) structures. And currently mesh structure, the material for which is carbon fiber, are widely used in space technology for the manufacture of hollow tubular and conical designs of the spacecraft. The most common method of making carbon mesh designs is the winding of carbon fibers. However, with all the positive qualities of CFRP structures, in connection with the pointedness of their structure, and their effective use is possible only under uniaxial loading when tensile and compressive stresses coincide with the fiber direction. In the case of complex resistance or bending when the material occurs in the complex stress state can cause the destruction, as from the action of shear stresses and normal stresses. Strict fiber orientation in one direction leads to anisotropy of physical and mechanical properties of unidirectional composites. When the load applied normal to the direction of the fibers is destroyed by carbon fiber construction practically without preliminary plastic deformation. The problem of improving the mechanical properties of the CFRP materials was successfully solved by introducing in the polymer binder nanopowders of different chemical compounds – a process called nanomodification. And, in this regard, the most effective was the carbon nanopowders, including nanodiamonds.

Keywords: space vehicles, weight reduction, nanomodification polymer binder.

Введение. Одной из важных проблем космического машиностроения является максимально возможное снижение массы как собственно космического аппарата (КА) [1], так и средств доставки его на орбиту, т. е. ракеты-носителя (РН) [2]. При этом при изготовлении различных деталей и узлов КА и РН решение этой проблемы может реализовываться как через изменение их конструкции, так и в результате применения новых материалов и технологий.

Одним из прогрессивных решений этой проблемы явилось применение так называемых сетчатых (анизотридных – *anisogrid*, *anisotropic grid*; анизотропия – от греч. *ánisos* – «неравный» и *trópo* – «направление») конструкций, применением которых в авиастроении одним из первых начал заниматься В. В. Васильев [3]. И настоящее время сетчатые конструкции, материалом для которых является углепластик, широко применяются в космической технике [4] для изготовления различных пустотелых трубчатых и конических конструкций КА. Одна из таких конструкций – адаптер, обеспечивающий механическое соединение космического аппарата с ракетой-носителем, показана на рис. 1.

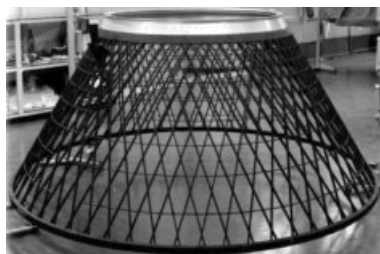


Рис. 1. Сетчатый адаптер [4]

Fig. 1. Netted adapter circuit [4]

В настоящее время распространенным способом изготовления углепластиковых сетчатых конструкций является их намотка из углеродных волокон [5]. В частности, адаптер РН «Протон-М» изготавливался намоткой ленты, состоящей из пропитанных эпоксидным связующим углеродных жгутов, на коническую оправку, покрытую эластичным материалом [4] (рис. 2).

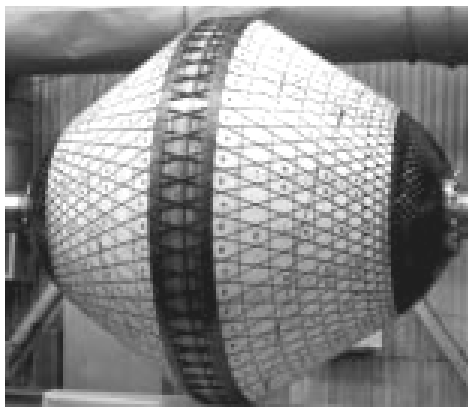


Рис. 2. Намотка двух адаптеров полезной нагрузки для ракеты-носителя «Протон-М» [4]

Fig. 2. Spinning of two adapter circuits of net load for the booster “Proton-M” [4]

Однако при всех положительных качествах углепластиковых конструкций, в связи с однонаправленностью их структуры, их эффективное использование возможно только при одноосном нагружении, когда растягивающие и сжимающие напряжения совпадают с направлением волокон [6]. В случае сложного сопротивления или изгиба, когда в материале возникает сложное напряженное состояние, могут произойти разрушения как от действия скалывающих касательных напряжений, так и от нормальных напряжений [7]. Строгая ориентация волокон в одном направлении обуславливает анизотропию физико-механических свойств однонаправленных композитов. При нагрузке, приложенной нормально к направлению волокон, происходит разрушение углепластиковой конструкции практически без ее предварительной пластической деформации, что показано, например, на рис. 3.

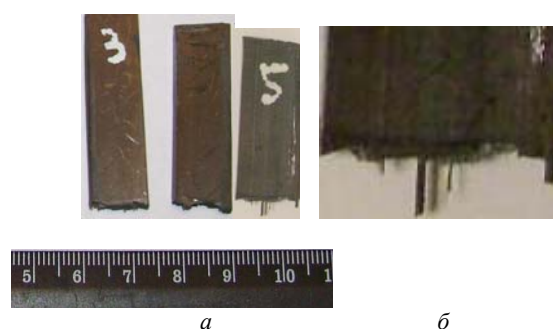


Рис. 3. Фрагменты углепластиковой конструкции адаптера (а); в нижней части образца № 5 видны волокна (б)

Fig. 3. The segment of carbon construction of adapter circuit (а); at the bottom the sample № 5 we can see threads (б)

Наномодифицирование. С целью повышения функциональных возможностей углепластиковых конструкций представляется возможным использовать результаты исследований [8], полученные при введении в протекторную резину материалов, относящихся к эластомерам, как и эпоксидные материалы, применяющиеся в качестве связующих при производстве углепластиков, нанопорошка природного графита. Работа была выполнена с целью установления возможности замены в составе протекторных резин, применяющихся при производстве грузовых шин, технического углерода – дорогостоящего продукта, получение которого технологически сложно, кроме того, это связано с ухудшением экологической обстановки.

Исходя из свойств природного скрытокристаллического графита Курейского месторождения [9] и учитывая присутствие в нем до 4 мас. % золы, содержащей различные окислы, в том числе металлов (28,38 % SiO_2 ; 14,57 % Fe_2O_3 ; 26,77 % CaO ; 0,06 % P_2O_5 ; 0,82 % TiO_2 ; 0,353 % MnO ; 1,41 % Na_2O ; 21,43 % Al_2O_3 ; 5,32 % MgO ; 0,25 % K_2O) [10], было решено опробовать его в рецептуре таких протекторных резин, в которых они выполняют активную роль в процессе структурирования каучука. Следует при этом отметить, что использование для этой цели природного графита экономически выгоднее, чем синтетического углерода, так как

последний производится на специализированных заводах, тогда как курейский графит добывается открытым способом, а для его применения в резинах требуется только произвести измельчение, в связи с чем себестоимость графитовых наполнителей оказалась на 25–30 % ниже, чем для синтетического углерода.

С этой целью была разработана технология измельчения графита [11], при которой кусочки руды с размерами порядка 10 мм измельчали вначале в щековой мельнице до размеров частиц менее 0,1 мм с удельной поверхностью до 6 м²/г, дальнейшее измельчение производили в центробежно-планетарной мельнице при ускорении 40 g. При этом были подобраны, количественно оптимизированы и интеркалированы в межплоскостное пространство графитовых сеток соответствующие детергенты, которые в процессе обработки позволили разрушить графит, практически не разрушая графитовые сетки. Такое диспергирование графита не приводит к появлению низкомолекулярных соединений со свойствами смол или асфальтентов и поэтому только увеличивает удельную поверхность до 60–80 м²/г при получении частиц графита размером около 50 нм с содержанием углерода до 91,6 мас. %. Измельчение с применением центробежно-планетарной мельницы сводится не только к диспергированию, но и к механоактивации измельчаемых частиц, что повышает их энергонасыщенность [12] в результате накопления структурных дефектов, увеличения кривизны поверхности и даже аморфизации кристаллов (в данном случае графита), что усиливает их химическую активность [13], а при использовании в изделиях – улучшает их физико-механические и, как следствие, эксплуатационные характеристики.

Полученный графитовый нанопорошок (НП) в количестве 5 мас. % вводили в состав «резиновой смеси» (каучук, технический углерод, кремниевая кислота, сера, масла и смолы, вулканизационные активаторы – до 20-ти компонентов по ГОСТ 5513–97) взамен технического углерода и выполняли все технологические операции, связанные с производством протекторных резин, в результате чего получали резину, характеристики которой превышали таковые для обычной резины (см. таблицу). Причем присутствующие в объеме резины наночастицы углерода не только приводят к ее упрочнению [14], но и вследствие того, что важнейшей особенностью ультрадисперсных систем является их исключительно развитая поверхность, вблизи которой находится значительная доля атомов [15], наночастицы вносят определенный антивибрационный вклад за счет уменьшения амплитуды колебаний в результате возникновения эффекта трения на их поверхностях.

Полученные данные показывают, что введение НП графита в протекторные резины способствует снижению теплообразования и обеспечивает существенное повышение усталостной выносливости в различных режимах деформации. Этот факт следует рассматривать как имеющий большое практическое значение, поскольку упругогистерезисные и усталостные свойства резин во многом определяют эксплуатационные характеристики пневматических шин. Кроме того, эти результаты подтвердили теоретические представления о механизме влияния природного графита на свойства резины.

Следует отметить, что эти результаты совпадают на качественном уровне с данными, опубликованными известной в области производства и применения нанопорошков фирмой NaBond Technologies Co., Ltd. HONG KONG (納邦技術有限公司) [16], согласно которым в результате введения в резину нанопорошка кабида кремния SiC повышаются эксплуатационные характеристики изготавливаемых из нее изделий, а также с данными работы [17], в которой описаны положительные эффекты от введения наночастиц оксида алюминия в металлорезиновые композиты, используемые для изготовления тормозных колодок, эксплуатация которых проходит в жестких условиях, включая вибрацию.

Увеличение прочностных характеристик пластмассы в 3–4 раза было получено [18] при введении в нее двуокиси кремния SiO₂ с размерами частиц до 50 нм, в результате того, что плавящаяся пластмасса заполняет мельчайшие пустоты в наночастицах, что создает прочные связи между атомами SiO₂ и пластмассой на большой площади поверхности. И нагрузка, воздействующая на нанопластмассу, делится в ее объеме на множество взаимодействий с наночастицами SiO₂. По мере продвижения трещины в композите она дробится на все меньшие и меньшие трещинки, пока материал не поглотит (рассеет – dissipated) энергию нагрузки. Авторы назвали разработанный способ синергетическим упрочнением, или наномасштабным упрочнением. Разработанная нанопластмасса показала такую же теплостойкость, как и пластмассы с графитовыми волокнами, но выдерживала ударные нагрузки в 4–5 раз больше.

В свете изложенного, следует согласиться с авторами работы [19], которые считают, что перспективным решением проблемы получения углепластиков с повышенными характеристиками является создание углепластиков со связующим, в объеме которого равномерно распределены ультрадисперсные углеродные частицы.

Влияние НП графита на свойства протекторных резин

Показатель	Резиновая смесь	
	Стандартный состав	С добавкой 5 мас. ч. нанопорошка графита
Условное напряжение при 300%-м удлинении, МПа	9,2	10,1
Условная прочность при растяжении, МПа	21,8	21,6
Сопротивление многократному растяжению, 1000 циклов	80	103
Сопротивление образованию трещин, 1000 циклов	219	283

Подобная технология применяется при изготовлении углепластиковых конструкций в АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения» (г. Хотьково) – ведущем предприятии России по производству конструкций из современных полимерных композитных материалов для ракетно-космической техники. Анализ и сопоставление данных различных экспериментов показал [19], что все типы исследуемых частиц эффективно влияют на трещиностойкость (критический коэффициент интенсивности напряжений возрастает в 1,5–2 раза) эпоксидной матрицы. Но при этом в зависимости от дисперсности частиц основными являются различные структурные механизмы. Для более крупных частиц (размер агрегатов от 60 до 100 нм) основным является механизм задержки фронта трещины прилегающими к агрегатам структурированными областями полимера (рис. 4). Для более мелких частиц преобладает механизм сопротивления образованию трещин на счет снижения дефектности и неоднородности эпоксидной матрицы.

При исследовании полимерных материалов, содержащих ультрадисперсные углеродные частицы (УДЧ), было замечено [20], что путь движения трещины в композите с малыми включениями требует больших затрат энергии. УДЧ не являются концентраторами напряжений в отличие от более крупных частиц; введение УДЧ приводит к упорядочению морфологической структуры полимера. Они также могут служить в качестве центров сшивки полимерной сетки (т. е. способны залечивать дефекты сетки), могут агломерировать, образуя пространственный каркас в объеме полимерного композиционного материала. Модифицирующая способность углеродных УДЧ обусловлена их большими энергетическим потенциалом [21], который связан с высокой концентрацией атомов на поверхности частицы (по сравнению с концентрацией

в объеме), большой удельной поверхностью однонаправленного углепластика на его основе. Для модифицированной матрицы наблюдается смена механизма разрушения при ударном воздействии с хрупкого до псевдопластичного, который обусловлен образованием фрактала структурной поврежденности. Исследования показали [19], что введение алмазографитных частиц приводит к росту адгезии связующего к волокну, что отражается на смене механизма разрушения однонаправленных образцов при растяжении и сдвиге (рис. 5).

Повышение функциональных возможностей углепластиковых конструкций успешно решается с помощью наномодифицирования полимерного связующего путем введения в него углеродных нанотрубок или наночастиц, включая и детонационные наноалмазы [22; 23], а также фуллеренов. В работе [24] установлено, что при модифицировании полимерной матрицы фуллеренами предел прочности углепластика при сжатии повышается на 31 %, а предел прочности при растяжении – на 10 %, что связано с повышением вязкости разрушения матрицы, в результате чего снижается вероятность образования в ней хрупкой трещины, и образующиеся при нагружении образцов трещины не распространяются прямолинейно, а проходят волнообразно.

Алюминиевые профили с волокнистой структурой. Возможен еще один вариант изготовления сетчатых пустотелых конструкций с применением протяженных профилей с волокнистым внутренним строением (рис. 6), которые получают путем прессования композиции из частиц алюминиевого сплава и нанопорошков химических соединений (нитриды, оксиды, карбиды и др.) [25]. Полученные таким способом профили имели тонкостенную оболочку (десятые доли мм) и внутреннее волокнистое строение, а их сечение определялось геометрией фильеры.

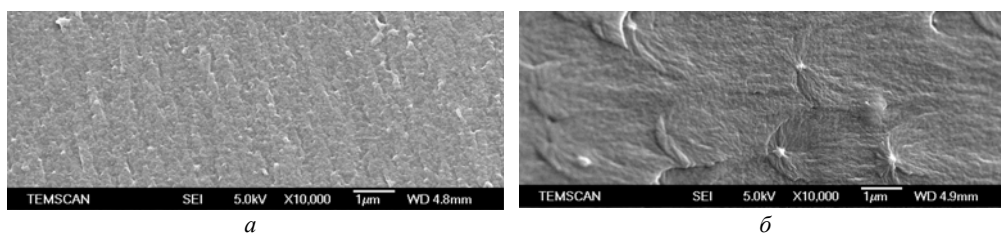


Рис. 4. Поверхность разрушения немодифицированного эпоксидного связующего (а) и модифицированного ультрадисперсными частицами 0,025 % УДП-АГ ($\times 10000$) (б) [19]

Fig. 4. The surface of destruction of intact epoxide binders (a) and modified ultrafine particles, 0.025 % UDP-AG ($\times 10000$) (b) [19]

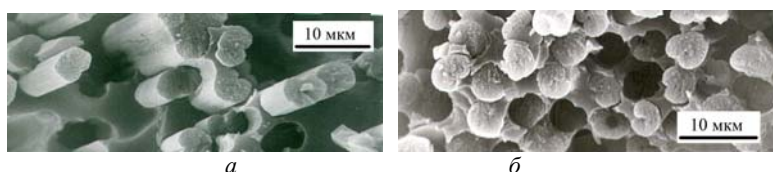


Рис. 5. Поверхность разрушения однонаправленного углепластика без модификации (а) и модифицированного АДП-АГ (б) [19]

Fig. 5. The surface of destruction of UD carbon without design change (a) and modified UDP-AG (b) [19]

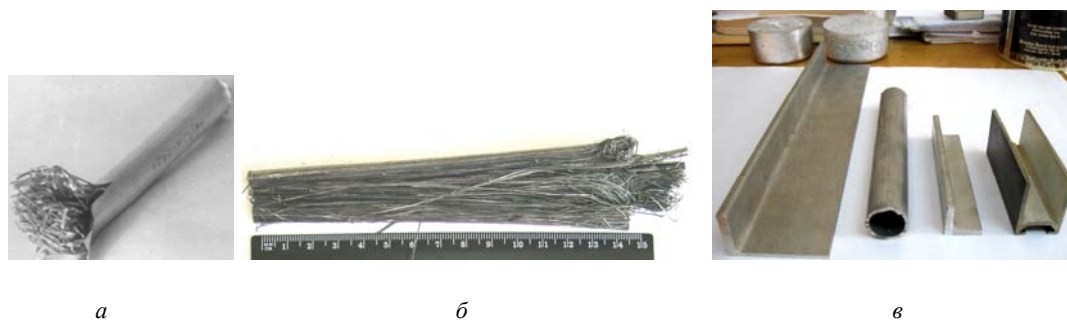


Рис. 6. Волокнистый пруток $\varnothing 9,5$ мм со вспоротой оболочкой (а, б); профили (для сравнения, на заднем плане литые пробы $\varnothing 72$ мм) (в)

Fig. 6. Fibrous bar stock $\varnothing 9,5$ m with cut open cover (a; б); the forms (on the background for comparison the molded tests $\varnothing 72$ mm are given) (в)

Механические свойства прутка $\varnothing 9,5$ мм с волокнистой структурой, отпрессованного из гранул алюминиевого сплава АД0, составляют: $\sigma_b = 98,1$ МПа, $\sigma_{0,2} = 48,1$ МПа и $\delta = 42,8$ мм, тогда как при его прессовании из смеси таких же гранул + НП ВН σ_b повышается до 113,8 МПа (на 16,0 %), $\sigma_{0,2}$ – до 56,9 МПа (на 18,3 %) и δ – до 43,2 (на 0,9 %), а из гранул и НП TiCN – σ_b повышается до 121,6 МПа (на 24,0 %), $\sigma_{0,2}$ – до 59,9 МПа (на 22,5 %) и δ – до 43,9 (на 2,6 %). Испытания при поперечном знакопеременном изгибе от вертикали в обе стороны на 90° прутков $\varnothing 5$ мм из того же сплава показали, что для их полного разрушения в месте закрепления требуется 9–11 циклов, тогда как прутки, отпрессованные из гранул и НП TiCN, разрушаются через 18–20 циклов. Высокая пластичность волокнистых профилей демонстрируется на рис. 7. В настоящее время разрабатывается техническая документация на изготовление сетчатых конструкций из профилей с волокнистой структурой.



Рис. 7. Изгиб прутка $\varnothing 5$ мм с волокнистой структурой

Fig. 7. The bar stock bend $\varnothing 5$ mm with fibrous structure

Выводы и заключение. В результате рассмотрения технологий производства пустотелых конструкций летательных аппаратов установлены те или иные особенности применения для этой цели пенометаллов и углепластиков и рассмотрена возможность применения для этой цели профилей с волокнистой структурой, полученных методом экструзии композиции, состоящей из пластичного металла (на примере алюминия или алюминиевых деформируемых сплавов) и нанопорошков высокопрочных химических соединений (нитриды, оксиды, карбиды и др.).

Библиографические ссылки

1. Доматырко Д. Г., Литвиненко В. П. Оптимизация массогабаритных характеристик космических аппаратов двойного назначения // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7, № 7. С. 41–42.
2. Kishore N. P., Alekhya N. Reduction of mass for base structure of a spacecraft using CFRP // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 2015. Vol. 4, iss. 8. P. 7237–7243.
3. Васильев В. В. Механика конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1988. 272 с.
4. Anisogrid composite lattice structures – Development and aerospace applications / V. V. Vasiliev [et al.] // Composite Structures. 2012. Vol. 94, iss. 3. P. 1117–1127.
5. Комков М. А., Тарасов В. А. Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражения. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 431 с.
6. Выбор оптимальной конфигурации при проектировании анизогридной конструкции / О. А. Исева [и др.] // Решетневские чтения: материалы XX юбилейной Междунар. науч.-практ. конф. / СибГАУ. Красноярск, 2016. Ч. 1. С. 30–32.
7. Generalov A. S., Boychuk A. S., Murashov V. V. Ultrasonic strength monitoring of carbon-fiber-reinforced plastics based on adhesive prepregs // Polymer Science. Series D. 2013. Vol. 6, № 2. P. 143–147.
8. Опыт использования ультрадисперсного порошка природного скрытокристаллического графита в протекторных резинах / В. А. Полубояров [и др.] // Ультрадисперсные порошки, материалы и наноструктуры: материалы межрегион. конф. / КГТУ. Красноярск, 1996. С. 155–156.
9. Обогащение графитовой руды Курейского месторождения / О. М. Смирнов [и др.] // Обогащение руд. 1999. № 1–2. С. 19–22.
10. Mineralogical and chemical analysis of graphite from Siberia // Short Report № MPSR/92/18. London: British Geological Survey, 1992. 4 p.
11. Новые возможности использования графитовой руды Курейского месторождения / Г. Г. Крушенко [и др.] // Обогащение руд. 1999. № 5. С. 7–8.

12. Болдырев В. В. Механохимия и механическая активация твердых веществ // *Успехи химии*. 2006. Т. 75, № 3. С. 203–216.
13. Butyagin P. Yu., Pavlichev I. K. Determination of energy yield mechanochemical reactions // *Reactivity of Solids*. 1986. Vol. 1, iss. 4. P. 361–372.
14. Упрочнение металлических, полимерных и эластомерных материалов ультрадисперсными порошками плазмохимического синтеза / М. Ф. Жуков [и др.]. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние РАН, 1999. 312 с.
15. Зубов В. И. Об особенностях термодинамики ультрадисперсных систем. Физикохимия ультрадисперсных систем : материалы IV Всерос. конф. М. : МИФИ, 1998. С. 23–26.
16. NaBond Technologies Co., Ltd. HONG KONG (納邦技術有限公司) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nabond.com/contact.htm> (дата обращения: 16.05.2017).
17. Effects of epoxidized natural rubber–alumina nanoparticles (ENRAN) composites in semi-metallic brake friction materials / A. Almaslow [et al.] (April–May 2013). Vol. 302, iss. 1–2. P. 1392–1396.
18. Toughening at nanoscale makes plastics suitable for aircraft use // *Materials Today*. 2000. Iss. 3. P. 8.
19. Ананьева Е. С., Маркин В. Б. Перспективы применения углепластиков комбинированного наполнения в авиакосмической технике // *Ползуновский вестник*. 2009. № 4. С. 223–226.
20. Структурные механизмы формирования механических свойств зернистых полимерных композитов / В. В. Мошев [и др.]. Екатеринбург : УрО РАН, 1997. 508 с.
21. Physical and chemical properties of modified nanodiamonds / A. P. Puzyr [et al.] // *Syntheses, Properties and Applications of Ultrananocrystalline: NATO Science. Series II. Mathematics, Physics and Chemistry*. 2005. Vol. 192. P. 261–270.
22. Гуняев Г. М., Каблов Е. Н., Алексашин В. М. Модифицирование конструкционных углепластиков углеродными наночастицами // *Российский химический журнал*. 2010. Т. LIV, № 1. С. 5–8.
23. Новиковский Е. А., Ананьева Е. С. Особенности реализации технологического процесса модификации эпоксидных компаундов углеродными нанотрубками и ультрадисперсными частицами // *Ползуновский вестник*. 2016. № 1. С. 102–107.
24. Думанский А. М. Проблемы материаловедения в машиностроении. М. : Ижевск : Ин-т компьютерных исследований, 2015. 52 с.
25. Крушенко Г. Г. Многоцелевой алюминиевый композит // *Технология металлов*. 2011. № 12. С. 19–22.
- Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2015, Vol. 4, Iss. 8, P. 7237–7243.
3. Vasil'ev V. V. *Mekhanika konstruktivnykh kompozitnykh materialov*. [Mechanics of structures of composite materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988, 272 p.
4. Vasiliev V. V., Barynin V. A., Razin A. F. et al. Anisogrid composite lattice structures – Development and aerospace applications. *Composite Structures*. 2012, Vol. 94, Iss. 3, P. 1117–1127.
5. Komkov M. A., Tarasov V. A. *Tekhnologiya namotki kompozitnykh konstruktivnykh raket i sredstv porazheniya* [The technology of filament winding composite structures of missiles and weapons]. Moscow, Izd-vo MGTU im. N. E. Bauman Publ., 2011, 431 p.
6. Iseeva O. A., Kravchenko Yu. S., Savitskiy V. V. et al. [Selection of the optimal configuration in the design anisogrid design]. *Reshetnevskie chteniya: materialy XX Yubileynoy mezhdunar. nauchno.-praktich. Konf.* [Reshetnev readings: proceedings of the twentieth Anniversary of the international. scientific.-practical. conf.]. 2016, Krasnoyarsk, SibSAU Publ., P. 30–32 (In Russ.).
7. Generalov A. S., Boychuk A. S., Murashov V. V. Ultrasonic strength monitoring of carbon-fiber-reinforced plastics based on adhesive prepreps. *Polymer Science. Series D*. 2013, Vol. 6, No. 2, P. 143–147.
8. Poluboyarov V. A., Krushenko G. G., Cherepanov A. N. et al. [Experience in the use of ultrafine powder of natural cryptocrystalline graphite in tread rubbers]. *Ul'tradispersnye poroshki, materialy i nanostruktury: Materialy mezhregion. konf.* [Ultradispersed powders, materials and nanostructures: Materials interregion. conf.]. Krasnoyarsk, KGTU Publ., 1996, P. 155–156 (In Russ.).
9. Smirnov O. M., Krushenko G. G., Shchipko M. L. et al. [Beneficiation of graphite ore deposits of Kureiskaya deposit]. *Obogashchenie rud*. 1999, No 1–2, P. 19–22 (In Russ.).
10. Mineralogical and chemical analysis of graphite from Siberia. Short Report № MPSR/92/18. London : British Geological Survey, 1992, 4 p.
11. Krushenko G. G., Shchipko M. L., Goncharov V. M. et al. [New uses for graphite ore deposits of Kureiskaya]. *Obogashchenie rud*. 1999, No 5, P. 7–8 (In Russ.).
12. Boldyrev V. V. [Mechanochemistry and mechanical activation of solids]. *Uspekhi khimii*. 2006, Vol. 75, No. 3, P. 203–216 (In Russ.).
13. Butyagin P. Yu., Pavlichev I. K. Determination of energy yield mechanochemical reactions. *Reactivity of Solids*. 1986, Vol. 1, Iss. 4, P. 361–372.
14. Zhukov M. F., Cherskiy I. N., Krushenko G. G. et al. *Uprochnenie metallicheskih, polimernykh i elastomernykh materialov ul'tradispersnymi poroshkami plazmokhimicheskogo sinteza*. [Strengthening of metallic, polymeric and elastomeric materials of ultradispersed powders plasma chemical synthesis]. Novosibirsk, Nauka, Sibirskoe predpriyatie RAN Publ., 312 p.
15. Zubov V. I. [About the features of the thermodynamics of ultradispersed systems]. *Fizikokhimiya ul'tradispersnykh sistem: Materialy IV Vseros. Konf.* [Physicochemistry of ultradisperse systems: materials of the IV Vseros. conf.]. Moscow, MIFI Publ., 1998, P. 23–26 (In Russ.).

References

1. Domatyрко D. G., Litvinenko V.P. [Optimization of weight and size characteristics of space vehicles of double purpose]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2011, Vol. 5, No. 7, P. 41–42 (In Russ.).
2. Kishore N. P., Alekhya N. Reduction of mass for base structure of a spacecraft using CFRP. *International*

16. NaBond Technologies Co., Ltd. HONG KONG (also known as 納邦技術有限公司) Available at: <http://www.nabond.com/contact.htm> (accessed 16.05.2017).
17. Almaslow A., Ratnam C. T., Ghazali M. J. et al. Effects of epoxidized natural rubber–alumina nanoparticles (ENRAN) composites in semi-metallic brake friction materials. *Wear*. April–May 2013, Vol. 302, Iss. 1–2, P. 1392–1396.
18. Toughening at nanoscale makes plastics suitable for aircraft use. *Materials Today*. 2000, Iss. 3, P. 8.
19. Anan'eva E. S., Markin V. B. [Perspectives of application of carbon fiber reinforced plastics combined filling in aerospace engineering]. *Polzunovskiy vestnik*. 2009, No. 4, P. 223–226 (In Russ.).
20. Moshev V. V., Svistkov A. L., Garishin O. K. et al. *Strukturnye mekhanizmy formirovaniya mekhanicheskikh svoystv zernistykh polimernykh kompozitov* [Structural mechanisms of the formation of mechanical properties of granular polymer composites]. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 1997, 508 p.
21. Puzyr A. P., Bondar V. S., Bukayemsky A. A., Seylutin G. E., Kargin V. F. Physical and chemical properties of modified nanodiamonds. In: *Syntheses, Properties and Applications of Ultrananocrystalline*. NATO Science Series. II. Mathematics, Physics and Chemistry, Springer. Kluwer Academic Publishers B. V., 2005, Vol. 192, P. 261–270.
22. Gunyaev G. M., Kablov E. N., Aleksashin V. M. [Modification of constructional carbon nanoparticles]. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*. 2010, Vol. LIV, No. 1, P. 5–8 (In Russ.).
23. Novikovskiy E. A., Anan'eva E. S. [Features of realization of technological process of modification of epoxy resins by carbon nanotubes and ultrafine particles]. *Polzunovskiy vestnik*. 2016, No. 1, P. 102–107 (In Russ.).
24. Dumanskiy A. M. *Problemy materialovedeniya v mashinostroenii*. [Problems of material science in mechanical engineering]. Moscow-Izhevsk, Institut komp'yuternykh issledovaniy Publ., 2015, 52 p.
25. Krushenko G. G. [Multi-purpose aluminum composite]. *Tekhnologiya metallov*. 2011, No. 12, P. 19–22 (In Russ.).

© Крушенко Г. Г., Исеева О. А., 2017

РЕАЛИЗАЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Е. Н. Ярцев*, В. П. Назаров, Н. С. Теряев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: yartseven.akruks@gmail.com

Изготовление и монтаж трубопроводов жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) является сложной технологической задачей, связанной с размещением магистралей в ограниченном пространстве по причине плотной компоновки двигателя.

В настоящее время методика, по которой разрабатывается комплект технологической документации на изготовление и монтаж трубопроводов, основывается на рекомендациях, указанных в нормативной документации (отраслевых стандартах). При этом такая технология требует большого количества ручного труда и не гарантирует обеспечения оптимальной конфигурации и надлежащего качества продукции.

Одним из путей решения указанных проблем является внедрение в технологический процесс производства жидкостного ракетного двигателя комплексной автоматизированной системы изготовления узлов трубопроводов сложной конфигурации с применением 3D-моделирования, что, в свою очередь, позволит исключить сложный и трудоемкий процесс эталонирования трубопроводов, снизить долю ручного труда в технологическом процессе производства ЖРД, повысить точность изготовления и сборки трубопровода, исключить необходимость подгибки трубопровода при монтаже, исключить из конструкции двигателя компенсирующие звенья.

Предлагается решение по модернизации технологического процесса сборки жидкостного ракетного двигателя, направленное на повышение производительности и качества выпускаемой продукции. Приведен алгоритм работы автоматизированной системы изготовления трубопроводов, рассмотрены технические условия для разработки управляющей программы (технологии) гибки трубопроводов на станках с числовым программным управлением.

Ключевые слова: производство, технологический процесс, автоматизация, жидкостный ракетный двигатель.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 3, P. 658–662

IMPLEMENTATION OF AUTOMATED SYSTEM FOR MANUFACTURING OF PIPELINES OF ROCKET ENGINES

E. N. Yartsev*, V. P. Nazarov, N. S. Teryaev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: yartseven.akruks@gmail.com

Production and assembling of pipelines to liquid rocket engines is a difficult technological challenge associated with the placement of pipelines in confined spaces.

Currently, the industry standards describe the main method by which developed a set of technical documentation for the manufacture and placing of pipes into rocket engine. Thus this technology requires large amounts of manual labor and does not guarantee the optimal configuration software and the quality of products.

The solution of these problems is introducing in the production process of liquid rocket engine automated manufacturing of pipes system, which use 3D-modeling. It allows to eliminate the complex and time-consuming process of manufacturing pipe's model, reduce labor in the process of production liquid rocket engine, improve accuracy of manufacturing and assembly of the pipeline, to eliminate the need to tuck a pipeline during assembling to liquid rocket engines, be excluded from the design of the engine compensating units.

The article proposes the solution for the modernization of technological assembly process liquid rocket engine, aimed at increasing productivity and product quality. The paper presents the algorithm of the automated manufacturing system of pipelines, considers the technical conditions for the development of the control program (technology) bending pipes on machines with numerical program management.

Keywords: workflow, technological process, automation, liquid rocket engine.

Введение. Проектирование, изготовление и монтаж трубопроводных систем жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) являются сложными задачами, связанными с размещением участков магистралей трубопроводов в ограниченных пространствах по причине плотной компоновки (рис. 1). В связи с этим трубопроводы современных ЖРД имеют следующие конструктивные особенности [1]:

- отсутствие или незначительное число прямолинейных участков и участков, описываемых кривыми второго порядка, преобладание произвольного построения траектории трубопровода, исходя из монтажного объема изделия или агрегата;
- малое количество плоских элементов, заданных двумя координатами, преобладание объемных элементов, заданных координатами, радиусом и углом;
- колебание конечных координат стыковки трубопровода к элементам двигателя;
- значительный ассортимент и типоразмеры применяемых труб;
- значительный ассортимент материалов труб;
- наличие явления пружинения материала;
- необходимость при проектировании трубопровода попасть в зону упругих деформаций материала и тем самым заложить основу серийного (партионного) изготовления трубопроводов.



Рис. 1. Пример компактного расположения трубопроводов со сложной пространственной геометрией на двигателе РД-182

Fig. 1. An example of a compact arrangement of pipelines with complex spatial geometry of the RD-182 engine

К трубопроводам предъявляются высокие требования по прочности, жесткости, герметичности, корро-

зионной стойкости, а также по геометрической точности и состоянию поверхности. В соответствии с заданными нагрузками и условиями эксплуатации основными материалами для изготовления трубопроводов являются легированные хромоникелевые стали (12X18H10T, X18H9T), алюминиевые сплавы (Д16, АМг6), титановые сплавы (ОТ4, ВТ6), жаропрочные сплавы (ХН60ВТ, ХН77ТЮР) и другие материалы с высокими физико-механическими характеристиками [2; 3].

Основная методика, по которой разрабатывается комплект технологической документации на изготовление и монтаж трубопроводов, описана в отраслевых стандартах (ОСТ 92-1600–84, ОСТ 92-1601–84, ОСТ 92-1602–92) и подразделяется на несколько этапов [4; 5]:

- создание полномасштабного макета ракетного двигателя (РД);
- создание по изготовленному макету эталонных трубопроводов;
- изготовление штатных трубопроводов по эталонам;
- монтаж штатных трубопроводов на РД с выполнением неизбежной подгибки.

Представленный процесс требует большого количества ручного труда и не гарантирует обеспечения оптимальной конфигурации и надлежащего качества продукции.

С другой стороны, сама конструкторская документация на узлы трубопроводов со сложной пространственной конфигурацией представляет собой чертежи либо со схематичным изображением траектории трубопровода, либо с большим количеством видов и сечений, что также приводит к усложнению процесса изготовления и монтажа трубопровода без выполнения предварительного макетирования.

Одним из путей решения указанных проблем является внедрение в технологический процесс производства жидкостного ракетного двигателя комплексной автоматизированной системы изготовления узлов трубопроводов сложной конфигурации с применением 3D-моделирования, что в свою очередь позволит [6–8]:

- исключить сложный, дорогостоящий и трудоемкий процесс эталонирования трубопроводов;
- повысить точность изготовления и сборки трубопровода;
- исключить операцию подгибки по месту;
- автоматизировать часть технологического процесса от проектирования до монтажа трубопроводов на двигатель;
- исключить влияние субъективного человеческого фактора на основных этапах работ;
- усовершенствовать технологию изготовления трубопроводов и их монтажа в составе РД за счет перехода на работу с 3D-моделью двигателя и визуализации процесса монтажа с установленной последовательностью сборки (создание видеороликов для обучения персонала сборочных производств);
- создать и хранить конструкторско-технологические данные о каждом трубопроводе в электронном виде в единой базе данных.

Алгоритм работы автоматизированной системы изготовления трубопроводов. На предварительном

этапе производится определение длины заготовки трубопровода. Для трубопроводов, имеющих изгибы и прямолинейные участки, длина заготовки рассчитывается методом развертки осевой линии [9]:

$$L = \sum_1^i l_1 + \sum_1^i R_i \cdot \varphi_i,$$

где $\sum_1^i l_1$ – сумма длин прямолинейных участков;

$\sum_1^i R_i \cdot \varphi_i$ – сумма длин криволинейных участков; R_i – радиус кривизны осевой линии трубопровода на i -м участке; φ_i – угол изгиба на i -м участке.

Определение длины заготовки необходимо проводить с учетом припусков на обработку торцов, приварку ниппелей, штуцеров и других соединительных элементов.

Исходные геометрические параметры и данные по конфигурации узла трубопровода можно получить двумя способами [10; 11]:

1. Измерив эталон-трубопровод с помощью современных контрольно-измерительных машин (рис. 2). Данный способ наиболее подходит для внедрения системы на этапе серийного изготовления ЖРД.

2. Получив геометрические параметры трубопровода из созданной конструктором 3D-модели двигателя (при этом необходимо корректировать координаты мест стыковки путем их измерения контрольно-измерительной машиной (КИМ) и внесения соответствующих изменений в 3D-модель) (рис. 3, 4). Этот способ предназначен для внедрения автоматизированной системы на этапе отработки (освоения) производства современных ЖРД, поскольку они проектируются с применением 3D-моделирования.

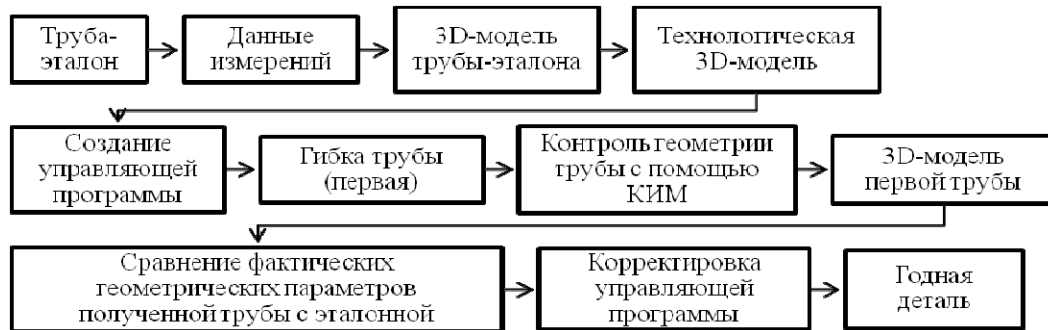


Рис. 2. Алгоритм работы системы (вариант 1)

Fig. 2. Algorithm of the system operation (option 1)



Рис. 3. Алгоритм работы системы (вариант 2)

Fig. 3. Algorithm of the system operation (option 2)

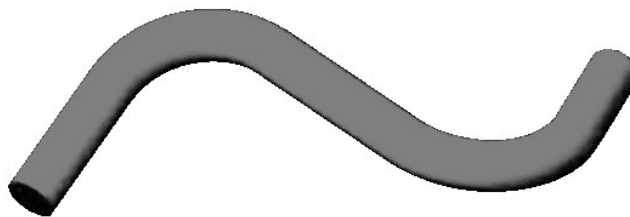


Рис. 4. 3D-модель трубопровода

Fig. 4. 3D model of the pipeline

На следующем этапе необходимо создать управляющую программу (УП) для осуществления гибки трубы на станке с числовым программным управлением, для чего может использоваться специальное технологическое программное обеспечение (например, TezetCAD). Данное технологическое программное обеспечение позволяет в автоматическом режиме на основе предоставленных данных разработать управляющую программу для трубогибочного станка с ЧПУ и представляет её либо в формате, поддерживаемом данной моделью оборудования, либо в виде таблицы MS Excel [12].

При составлении УП необходимо учитывать требования нормативной документации (ОСТ 92-1600-84) в части установки радиусов изгиба трубы:

- изгибы должны быть выполнены одним радиусом и не иметь двойной кривизны в пределах одногогиба;

- минимальные радиусы гибки трубы различных диаметров и с различными толщинами стенок по средней линии должны быть не менее величин, указанных на графике (рис. 5) [13; 14].

Также при создании управляющей программы для станка необходимо учитывать эффект пружинения материала. Расчет углагиба трубы с учетом пружинения осуществляется следующим образом [4; 7]:

1. Уголгиба трубы с учетом пружинения определяется по формуле

$$\lambda' = \lambda + \Delta\lambda,$$

где λ – уголгиба трубы; $\Delta\lambda$ – величина угла пружинения.

2. Величина $\Delta\lambda$ рассчитывается по формуле

$$\Delta\lambda = 57,3 \cdot \frac{\pi \cdot \lambda}{180} (1 - n + m \cdot R_0),$$

где R_0 – осевой радиусгиба трубы; n и m – коэффициенты, учитывающие материал, диаметр и толщину стенки трубы.

3. Коэффициенты n и m определяются по следующим формулам:

$$n = 1 - \frac{16 \cdot \Pi \cdot S \cdot R_c^3}{3E(R_n^4 - R_b^4)},$$

$$m = \frac{32\sigma_0 \cdot S \cdot R_c^2}{\sqrt{3}E\pi \cdot (R_n^4 - R_b^4)},$$

где S – толщина стенки трубы; R_n – наружный радиус трубы; R_c – средний радиус трубы; R_b – внешний радиус трубы; Π – модуль упругности; E – модуль упругости; σ_0 – предел текучести.

На следующем этапе данные управляющей программы необходимо внести в блок управления станка с ЧПУ для осуществления гибки трубы с последующим контролем конфигурации при помощи КИМ (путем сравнения исходной 3D-модели и данных, полученных в процессе измерения изготовленного трубопровода). В случае успешного прохождения операции контроля труба допускается в дальнейшую работу.

Заключение. Применение представленной технологической системы позволит исключить сложный и трудоемкий процесс эталонирования трубопроводов, снизить долю ручного труда в технологическом процессе производства ЖРД, повысить точность изготовления и сборки трубопровода, исключить необходимость подгибки трубопровода при монтаже, исключить из конструкции двигателя компенсирующие звенья.

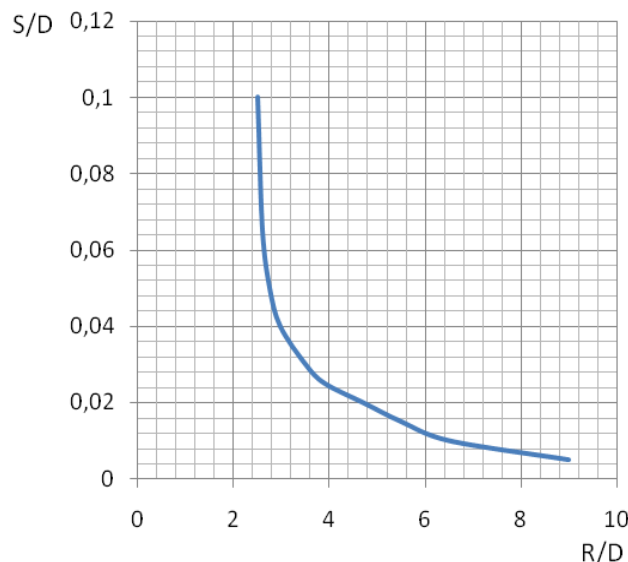


Рис. 5. График, определяющий зависимость радиуса допустимого изгиба трубы (R) от её диаметра (D) и толщины стенки (S) для осуществления холодной гибки

Fig. 5. The graph that determines the radius of the permissible bending of the pipe (R) from its diameter (D) and the wall thickness (S) for bending

Библиографические ссылки

References

1. Гахун Г. Г., Баулин В. И., Володин В. В. Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей. М. : Машиностроение, 1989. 424 с.
2. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3 т. Т. 1. / под ред. И. Н. Жестковой. 9-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 2006. 928 с.
3. Феоктистов С. И. Теория и практика изготовления элементов трубопроводов летательных аппаратов / М-во образования и науки Российской Федерации, Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. Комсомольск-на-Амуре : Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т, 2013. 88 с.
4. Ярцев Е. Н., Назаров В. П., Теряев Н. С. Обеспечение качества ракетного двигателя путем внедрения автоматизированной системы изготовления и монтажа трубопроводов сложной конфигурации // Решетневские чтения : материалы XX юбилейной Междунар. науч.-практ. конф., посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (09–12 нояб. 2016, г. Красноярск). В 2 ч. Ч. 1 / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. С. 205–206.
5. Технология производства жидкостных ракетных двигателей / В. А. Моисеев [и др.] М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 381 с.
6. McAllister E. W. Pipeline rules of thumb handbook: a manual of quick, accurate solution to every day pipeline engineering problem. Burlington, Ma : Gulf professional publ., 2009. 747 p.
7. Сахно К. Н., Дьяков А. С. Современные методы проектирования, изготовления и монтажа трубопроводов судовых систем // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. «Морская техника и технология». 2014. № 1. С. 26–32.
8. Сахно К. Н. Разработка технологий изготовления и монтажа судовых трубопроводов и их экономическое обоснование // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. «Морская техника и технология». 2011. № 3. С. 22–29.
9. Рубинович Л. Д. Изготовление и монтаж трубопроводов : справ. изд. / под ред. Л. Д. Рубиновича. М. : Пищевая промышленность, 1966. 232 с.
10. Ганов Э. В., Смирнова И. А. Применение ЭВМ для выполнения чертежей и подготовки производства изготовления судовых трубопроводов // Судостроение. 2003. № 5. С. 51–52.
11. Селезнев В. Е., Алешин В. В., Прялов С. Н. Математическое моделирование магистральных трубопроводных систем : справ. изд. М. : МАКС-Пресс, 2009. 357 с.
12. Цифровое производство [Электронный ресурс]. URL: http://www.plm.automation.siemens.com/ru_ru/plm/digital-manufacturing.shtml (дата обращения: 29.12.2016).
13. ОСТ 92-1600–84. Производство трубопроводов. Общие технические условия. Эталонирование трубопроводных систем, гибка труб и формообразование концов трубопроводов. Введен : 01.01.1986. 54 с.
14. ОСТ 92-1601–84. Производство трубопроводов. Общие технические условия. Сборка, окраска, маркировка, очистка, контроль и монтаж трубопроводов. Введен : 01.07.1986. 40 с.
1. Gakhun G. G. *Konstruktsiya i proektirovanie zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [The construction and design of liquid rocket engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989, 424 p.
2. *Spravochnik konstruktora-mashinostroitel'ya* [Manual Machinist, Vol. 1]. Moscow, Engineering Publ., 2006, 928 p.
3. Feoktistov S. I. *Teoriya i praktika izgotovleniya elementov truboprovodov letatel'nykh apparatov* [Theory and practice of manufacturing elements of pipelines of aircraft]. Komsomolsk-on-Amur, Technical University Press, 2013, 88 p.
4. Yartsev E. N., Nazarov V. P., Teryaev N. S. [Ensuring quality of rocket engine by application the automated system of manufacturing and assembly complex configuration pipe]. *Reshetnevskie chteniya: materialy XX yubileynoy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Krasnoyarsk, 2016, P. 205–206 (In Russ.).
5. Moiseev V. A., Tarasov V. A., Kolmykov V. A., Filimonov A. S. *Tekhnologiya proizvodstva zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Technology of production of liquid rocket engines]. Moscow, Publishing House of the MSTU. NE Bauman, 2008, 381 p.
6. McAllister E. W. Pipeline rules of thumb handbook: a manual of quick, accurate solution to every day pipeline engineering problem. Burlington, Ma: Gulf professional Publ, 2009, 747 p.
7. Sahno K. N., Dyakov A. S. [Modern methods of designing, manufacturing and installation of pipelines ship systems]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*. 2014, No. 1, P. 26–32 (In Russ.).
8. Sahno K. N. [Development of manufacturing technologies and installation of marine pipelines and their economic rationale]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*. 2011, No. 3, P. 22–29 (In Russ.).
9. Rubinovich L. D. *Izgotovlenie i montazh truboprovodov* [Fabrication and installation of pipelines]. Moscow, Pishchevaya promyshlennost' Publ., 1966, 232 p.
10. Ganov E. V., Smirnova I. A. [The use of computers to execute drawings and preparation of manufacturing of ship piping production]. *Sudostroenie*. 2003, No. 5, P. 51–52 (In Russ.).
11. Seleznev V. E., Aleshin V. V., Pryalov S. N. *Matematicheskoe modelirovanie magistral'nykh truboprovodnykh sistem* [Mathematical modeling of trunk pipeline systems]. Moscow, 2009, 357 p.
12. Siemens A. G. *Tsifrovoe proizvodstvo* [Digital production]. Available at: http://www.plm.automation.siemens.com/ru_ru/plm/digital-manufacturing.shtml (accessed 12.29.2016).
13. *OST 92-1600–84 Production pipeline. General specifications. Standardization of piping systems, pipe bending and shaping the ends of pipes.*
14. *OST 92-1601–84 Production pipeline. General specifications. The assembly, painting, marking, cleaning, inspection and installation of pipelines.*

РАЗДЕЛ
PART
4



ЭКОНОМИКА

ECONOMICS AEROSPACE
INDUSTRY



ПРОЕКТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ В ТЕРРИТОРИЯХ ОПЕРЕЖАЮЩЕГО СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ

Н. Т. Аврамчикова¹, Ю. В. Данильченко¹, М. Б. Пучкин^{2*}

¹Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

²Консалтинговое агентство MBP Consulting
Российская Федерация, 660028, г. Красноярск, ул. Телевизорная, 1, стр. 9

*E-mail: poochkin@yandex.ru

Проектное управление отличается от менеджмента, в классическом понимании этого слова, в части гибкости в зависимости от масштабности, специфики и новизны реализуемых проектов. Особенно эти отличия становятся заметными относительно управления инновационной деятельностью в рамках системы органов государственной исполнительной власти в территориях опережающего социально-экономического развития (ТОСЭР). Территория опережающего социально-экономического развития – часть территории субъекта Российской Федерации, включая закрытое административно-территориальное образование (ЗАТО), на которой в соответствии с решением Правительства Российской Федерации установлен особый правовой режим осуществления предпринимательской и иной деятельности. Являясь, по сути, комбинацией процессного и функционального подхода к управлению, проектное управление имеет свои, присущие только ему, преимущества, позволяющие более эффективно управлять таким сложным процессом, как инновационная деятельность. С учётом специфики инновационного развития ЗАТО проектное управление инновационной деятельностью в ТОСЭР определяется как вид управленческой деятельности, определяющий согласованную работу органов государственного управления, органов местного самоуправления и представителей бизнеса по созданию льготных режимов ведения инновационной деятельности в территориях опережающего социально-экономического развития, учитывающий интересы их резидентов, государства, региона и муниципального сообщества и обеспечивающий рациональное использование бюджетных ресурсов. Гибкость проектного управления в зависимости от масштабности, специфики и новизны реализуемых проектов позволяет подбирать оптимальную структуру управления – функциональную, матричную или проектную. Проектное управление инновационной деятельностью в ТОСЭР осуществляет управляющая компания – акционерное общество, которое определено Правительством Российской Федерации в целях осуществления функций по управлению территориями опережающего социально-экономического развития. Задачами дальнейшего совершенствования системы проектного управления инновационной деятельностью в ТОСЭР являются гармонизация нормативно-правовой базы, обеспечение стабильного финансирования инновационных проектов и ускоренной подготовки квалифицированных кадров.

Ключевые слова: ТОСЭР, проект, проектное управление, проектный офис, инновационная деятельность.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 3, P. 664–672

PROJECT MANAGEMENT OF INNOVATIVE ACTIVITY IN TOSER

N. T. Avramchikova¹, Yu. V. Danilchenko¹, M. B. Poochkin^{2*}

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

²Consulting agency “MBP Consulting”
1/9, Televizornaya Str., Krasnoyarsk, 660028, Russian Federation

*E-mail: poochkin@yandex.ru

A project management differs from management in the classical meaning of the word. It's an issue of flexibility depending on the scale, the specificity and novelty of the projects. Especially these differences become visible regarding the innovative activity management in the system of state Executive bodies in the territories of priority socio-economic development (TOSER). TOSER is a part of the territory of the Russian Federation. It includes closed administratively-territorial formations (ZATO), which in accordance with the decision of the Government of the Russian Federation established a special legal regime of business activities. Project management is essentially a combination of process and functional approach to management. But it has its special advantages, to more effectively manage such a complex process as innovation. The definition of the project management of innovative activities in TOSER takes into account

the specifics of innovation development ZATO. It is a management discipline that defines the coordinated work of state bodies, local authorities and business representatives to create preferential treatment to conduct innovative activities in the territories of priority socio-economic development, taking into account the interests of their residents, the state, region and municipal community and ensuring the rational use of budget resources. The flexibility of project management depending on the scale, the specificity and novelty of the projects allows you to choose the optimal governance structure – functional, matrix or project. Design management of the innovative activities in the TOSER is conducted by the operating company. It is a joint-stock company, which is defined by the Government of the Russian Federation in order to carry out the functions for managing territories of priority socio-economic development. Tasks to further improve the system of project management of innovative activities in TOSER are the harmonization of the regulatory framework, sustainable funding for innovative projects and accelerated training of qualified personnel.

Keywords: the territories of priority socio-economic development (TOSER), project management, project office, innovative activity.

Введение. Дальнейшее инновационное развитие экономики России, формирование «цифровой» экономики, устранение отставания от ведущих мировых держав в ключевых отраслях промышленности и направлениях научно-прикладных исследований требует решительных и согласованных действий органов государственной власти, бизнеса и общества. Для полноценного развития экономики России решающее значение имеет развитие Сибири и Дальнего Востока. Данные территории обладают высокой концентрацией таких стратегически значимых энергоресурсов, как нефть, газ, уголь. Сибирский регион имеет развитую гидроэнергетику. Дальний Восток богат биоресурсами. Сибирь и Дальний Восток не только составляют природно-ресурсную базу страны (металлы, алмазы, золото, древесина), но и имеют высокий научно-технический (СО и ДО РАН, федеральные университеты) и технологический потенциал (здесь находятся три из десяти ЗАТО атомной отрасли и многочисленные промышленные моногорода). Чётко наметившийся вектор развития страны в восточном направлении определяет территории Сибири и Дальнего Востока как основной транспортно-логистический коридор для продвижения российских товаров на рынки стран азиатско-тихоокеанского региона (АТР). Эти обстоятельства позволяют Сибири и Дальнему Востоку, с одной стороны, экономически развиваться более высокими по сравнению со среднероссийскими темпами, а с другой – успешно интегрироваться в экономическое пространство стран АТР, являясь тем самым «драйвером» роста всего экономического развития России. В этой связи руководством страны взят курс на ускоренное развитие Дальнего Востока и Сибири, улучшение социально-экономической ситуации в моногородах и закрытых административных территориальных образованиях (ЗАТО). Федеральный закон Российской Федерации от 29 декабря 2014 г. № 473-ФЗ «О территориях опережающего социально-экономического развития в Российской Федерации» позволил формировать ТОСЭР в «отстающих» регионах и «депрессивных» моногородах, имеющих значительный потенциал инновационного развития. Решение задачи эффективного управления инновационной деятельностью в ТОСЭР потребует использования передовых мировых методик, технологий управления и использования лучших доступных практик, в том числе инструментов проектного управления. Несмотря на то, что в настоящее время в России создана

инновационная инфраструктура и достаточно успешно функционирует система управления инновационной деятельностью, её результативность существенно отстаёт от ведущих мировых держав. Единая государственная система проектного управления не создана, а инструменты проектного управления в системе управления инновационной деятельностью практически не используются. Одной из причин этого является несогласованность деятельности исполнительных органов федеральной, региональной и муниципальных властей при реализации инновационных проектов в создаваемых ТОСЭР. Данный факт определяет актуальность проблемы и обуславливает необходимость её исследования.

Проектное управление инновационной деятельностью и его преимущества. В настоящее время использование проектного управления инновационной деятельностью в корпоративной среде уже стало отдельным профессиональным стандартом. Примером одной из доступных лучших практик в этой области может служить корпоративная система управления проектами (КСУП) (Corporate Project Management System, CPMS) [1]. Наибольшей популярностью пользуются высокоэффективные автоматизированные КСУП [2].

Под проектом в широком смысле этого понятия – сугубо коммерческим, некоммерческим или государственным (региональным, муниципальным), понимают разовый вид деятельности, обладающий следующими характеристиками:

- наличие конечной цели и промежуточных задач;
- производство и получение точно определённого результата, который может быть оценён;
- установление набора последовательных взаимосвязанных действий;
- наличие обозначенных временных рамок (дата начала и окончания);
- использование ограниченного количества ресурсов: финансовых, информационных, инфраструктурных, человеческих и др. [3].

Стандарт Института управления проектами (PMI) PMBoK Guide описывает модель проектного управления с точки зрения пяти основных групп процессов – стадий или фаз движения (реализации) проекта [4]:

1. Процесс инициации (Initiating Processes) – принятие решения о начале проекта.
2. Процесс планирования (Planning Processes) – определение рабочих схем достижения целей проекта.

3. Процесс исполнения (Executing Processes) – координация людей и других ресурсов во время выполнения проекта.

4. Процесс контроля (Controlling Processes) – наблюдение и измерение результатов выполнения проекта и внесение необходимых коррективов.

5. Процесс завершения (Closing Processes) – оформление завершения проекта.

Функциональная структура управления проектами по стандарту Института управления проектами (PMI) PMBoK Guide включает в себя логически связанные разделы проекта [4], управление которыми можно представить в виде матрицы (см. таблицу) [5].

Таким образом, проектное управление сочетает в себе элементы процессного и функционального подхода. В то же время проектное управление обладает своими, присущими только этому виду управления, особенностями и преимуществами перед классическим менеджментом. К таким особенностям относятся [6]:

1. Ориентация на достижение определённой цели.

2. Направленность на удовлетворение интересов заказчика проекта.

3. Наличие чётких ограничений – по времени, финансам, ресурсам, персоналу и др.

4. Интенсивный характер деятельности, связанный с различными рисками.

5. Детальное планирование деятельности.

6. Ограниченное время существования команды проекта.

7. Результаты проекта оцениваются по его итогам.

В зависимости от масштабности и новизны реализуемых проектов подбирается оптимальная структура управления (рис. 1) – от функциональной (типичные небольшие проекты силами сложившейся проектной команды) до проектной (уникальные масштабные проекты силами специально формируемой команды узких специалистов) [5].

Матрица проектного управления

Функции	Группы процессов (стадии проекта)				
	Инициация	Планирование	Реализация	Контроль	Завершение
Управление содержанием	Определение границ проекта	Определение состава работ	Управление изменениями	Контроль результатов	Приёмка результатов
Управление стоимостью	Оценка стоимости	Разработка сметы и бюджета	Обеспечение финансирования	Контроль бюджета	
Управление временем	Углублённое планирование сроков	Разработка расписания	Координация работ	Контроль сроков	
Управление рисками	Анализ ключевых рисков	Планирование управления рисками	Формирование рискованных резервов	Мониторинг рисков	
Управление персоналом	Назначение руководителя проекта	Планирование персонала	Развитие команды	Оценка персонала	Мотивация и роспуск команды
Управление поставками	Анализ конъюнктуры рынка	Планирование поставок	Заключение договоров	Администрирование договоров	Закрытие договоров
Управление коммуникациями		Планирование коммуникаций	Взаимодействие по проекту	Отчётность по проекту	Итоговый отчёт
Управление качеством		Планирование качества	Обеспечение качества	Контроль качества	
Управление интеграцией	Разработка устава проекта	Разработка сводного плана-графика	Организация и координация работ	Контроль выполнения плана	Анализ результатов и уроков

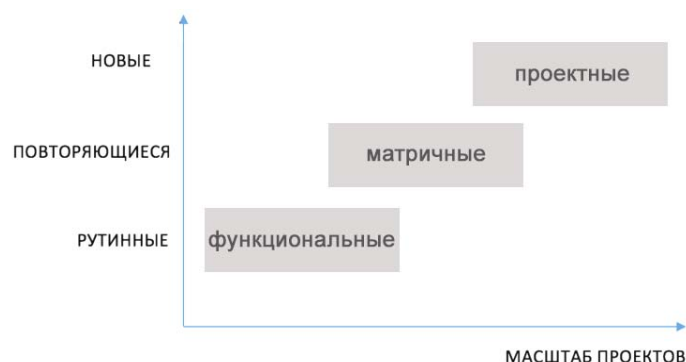


Рис. 1. Структуры управления проектами

Fig. 1. The structure of project management

Гибкость структуры управления проектами, в том числе несколькими одновременно реализуемыми, позволяет наиболее оптимально использовать в первую очередь человеческие ресурсы органов государственной власти и органов местного самоуправления, государственных корпораций, управляющих и инновационных компаний. Так, с учётом специфики проекта для его реализации может быть выбрана и использована функциональная или матричная, матричная или проектная структура управления.

Существующая в настоящее время в Российской Федерации система управления инновационной деятельностью позволяет сопровождать движение инновационного продукта на всех его стадиях, осуществляя координацию деятельности институтов развития в рамках существующей инновационной структуры и финансируя инновационные проекты как из средств федерального бюджета, так и с привлечением средств государственных и частных фондов.

Вопросы и различные аспекты проектного управления и управления инновационными проектами рассмотрены в работах российских и зарубежных авторов: К. Ч. Акберова, А. В. Алёшина, К. А. Багратиони, В. Богданова, В. Н. Буркова, В. В. Быковского, Д. Вайса, Р. Выщочки, Г. Дебазей, С. Дери, В. В. Ильина, Г. Карцнера, Х. Кима, К. Кларка, А. Кофмана, Д. Лакка, Д. А. Новикова, А. С. Товба, К. Хелдмана и др.

Большой вклад в разработку теории использования инструментов проектного управления внесли такие зарубежные авторы, как К. Ф. Грей, Э. У. Ларсон. Ими дано развёрнутое понятие проекта, раскрыты основы проектного управления, а также систематизированы ключевые инструменты [7]. Следует также отметить работы Т. ДеМарко, Т. Листера. В частности, данными авторами подробно рассмотрены вопросы идентификации и управления рисками проектов, а также изучен человеческий фактор в проектном управлении [8]. Весь набор инструментов проектного управления, включая матрицу проектного управления, проектный офис, управление изменениями и временем, а также опыт их использования, подробно рассмотрен Д. Милошевичем [5].

Среди российских авторов по тематике проектного управления необходимо особо выделить В. И. Воропаева, разработавшего системную модель управления проектами, В. М. Аньшина, предложившего систему управления портфелем проектов, Г. Л. Ципеса, разработавшего корпоративную систему управления проектами.

М. Л. Разу подробно рассмотрены основы управления проектами, приведены разновидности проектного управления и используемой организационной структуры, изучены сетевые модели и способы их оптимизации. Кроме этого, данным автором показаны возможности использования в проектном управлении информационно-технических моделей, а также раскрыта сущность управления стоимостью и продолжительностью проектов, управления качеством и управления рисками. А. О. Вылегжаниной с позиций методологии управления и современных подходов к проектному управлению изложены основы классификации, оптимального выбора и эффективного применения организационного инструментария мультипроектного управления.

Таким образом, общие теоретические вопросы проектного управления рассмотрены достаточно подробно как российскими, так и зарубежными авторами. Однако это, в первую очередь, касается реализации инновационных проектов корпоративным сектором экономики – крупными компаниями и государственными корпорациями. Вопросы же проектного управления инновационной деятельностью в территориях с особым режимом хозяйствования, таких как особые экономические зоны (ОЭЗ) и территории опережающего социально-экономического развития (ТОСЭР), практически не изучены и не рассмотрены.

Особенности проектного управления инновационной деятельностью в ТОСЭР. Территория опережающего социально-экономического развития – это часть территории субъекта Российской Федерации, включая закрытое административно-территориальное образование, на которой в соответствии с решением Правительства Российской Федерации установлен особый правовой режим осуществления предпринимательской и иной деятельности. ТОСЭР создаются в Российской Федерации на основании принятого 29 декабря 2014 года Федерального закона № 473-ФЗ [9].

Целями создания ТОСЭР является «выравнивание» уровня социально-экономического развития регионов России за счёт создания условий для их опережающего роста. В ходе создания ТОСЭР в регионах России решаются следующие задачи [10]:

- 1) формирование в территориях необходимой для их опережающего развития инфраструктуры;
- 2) создание благоприятного инвестиционного климата;
- 3) реализация государственно-частного партнёрства;
- 4) создание импортозамещающих производств с экспортным потенциалом;
- 5) создание новых высокотехнологичных рабочих мест;
- 6) развитие человеческого потенциала на территории;
- 7) улучшение качества жизни граждан.

При выборе резидентов территорий опережающего социально-экономического развития Правительство РФ прежде всего ориентируется на совпадение интересов бизнеса и государства. Для ТОСЭР требуется создание определённой инфраструктуры – транспортной, энергетической, коммунальной, инженерной, социальной, инновационной и пр. [11].

Территория опережающего социально-экономического развития создается на семьдесят лет по решению Правительства Российской Федерации на основании предложения уполномоченного федерального органа. Срок существования территории опережающего социально-экономического развития может быть продлен по решению Правительства Российской Федерации. Финансовое обеспечение развития инновационного бизнеса и объектов инфраструктуры территории опережающего социально-экономического развития осуществляется за счёт средств федерального бюджета, бюджета субъекта Российской Федерации и местных бюджетов, а также внебюджетных источников финансирования [9].

По состоянию на 01.07.2017 г. в Российской Федерации сформированы и начали свою работу 34 ТОСЭР, в том числе [12]:

- 16 – на Дальнем Востоке;
- 17 – в моногородах;
- 1 – в ЗАТО «Северск» (Нижегородская область).

Управление инновационной деятельностью в ТОСЭР осуществляется в рамках существующей в Российской Федерации системы проектного управления [13]. В данную систему входят постоянно действующий Проектный офис Правительства Российской Федерации и постоянно действующий Совет при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и приоритетным проектам [14]; проектный офис Российской венчурной компании [15]; проектный офис корпорации «Росатом» [16]; проектные офисы органов региональной [17] и муниципальной [18] властей и проектные офисы управляющих компаний особых экономических зон и территорий опережающего социально-экономического развития (рис. 2).

Реализация Федерального закона № 473-ФЗ от 29 декабря 2014 г. возложена на управляющие компании. Управляющая компания – акционерное общество, которое определено Правительством Российской Федерации в целях осуществления функций по управлению территориями опережающего социально-экономического развития и сто процентов акций которого принадлежит Правительству Российской Федерации, и (или) дочернее хозяйственное общество, которое создано с участием такого акционерного общества. Управляющая компания в рамках реализации закона № 473-ФЗ от 29.12.2014 г. решает следующие задачи [9]:

- 1) реализация в рамках ТОСЭР средне- и краткосрочных планов развития региона;
- 2) организация строительства и обеспечения функционирования инфраструктуры ТОСЭР;
- 3) предоставление резидентам ТОСЭР услуг, необходимых для осуществления инвестиционной и хозяйственной деятельности;
- 4) получение и передача резидентам ТОСЭР технических условий на подключение к сетям инженерно-технического обеспечения;
- 5) информационное и методическое сопровождение резидентов ТОСЭР.

Управляющей компанией в создаваемых ТОСЭР в ЗАТО атомной отрасли является АО «Атом-ТОР». В рамках осуществления функций по управлению территориями опережающего социально-экономического развития, созданными на территориях закрытых административно-территориальных образований, в которых расположены объекты Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом», управляющая компания осуществляет следующие функции [16]:

1. Ведёт реестр резидентов ТОСЭР, предоставляя в органы государственной власти и органы местного самоуправления в соответствии с их полномочиями документы, подтверждающие статус резидента ТОСЭР.
2. Обеспечивает функционирование объектов инфраструктуры ТОСЭР и (или) организует обеспечение их функционирования.
3. Организует предоставление резидентам ТОСЭР услуг, необходимых для осуществления деятельности в ТОСЭР (в том числе юридических услуг, услуг по ведению бухгалтерского учета, услуг по таможенному оформлению).
4. Осуществляет функции многофункционального центра предоставления государственных и муниципальных услуг в ТОСЭР в порядке, установленном Федеральным законом от 27 июля 2010 г. № 210-ФЗ «Об организации предоставления государственных и муниципальных услуг».
5. Размещает на своем официальном сайте в информационно-телекоммуникационной сети Интернет сведения о наличии земельных участков и иного недвижимого имущества, расположенных в ТОСЭР и подлежащих сдаче в аренду.
6. Получает технические условия подключения (технологического присоединения) к сетям инженерно-технического обеспечения и осуществляет передачу этих условий индивидуальным предпринимателям, юридическим лицам, осуществляющим строительство или реконструкцию.
7. Выступает в качестве застройщика объектов инфраструктуры ТОСЭР.



Рис. 2. Система проектного управления в Российской Федерации

Fig. 2. The system of project management of the Russian Federation

Реализация этих и других функций будет более эффективна в рамках проектного управления, так как система проектного управления позволяет работать с проектами разного масштаба, длительности и сложности на всех уровнях органов исполнительной власти и всех этапах реализации инновационных проектов и объединять усилия всех участников проекта.

На федеральном уровне в Проектном офисе Правительства Российской Федерации течение 2015–2017 гг. по ключевым направлениям деятельности были созданы 11 проектных групп. На межрегиональном уровне на базе Российской венчурной компании создан проектный офис. В рамках его работы разработаны и реализуются дорожные карты 7 национальных технологических платформ [13]: «Авианет»; «Энерджинет»; «Аэронет»; «Маринет»; «Нейронет»; «Хелснет»; «Технет».

На межрегиональном и региональном уровнях госкорпорацией «Росатом» в рамках существующего проектного офиса были успешно разработаны концепции создания ТОСЭР ЗАТО г. Саров, ЗАТО г. Железногорск и ЗАТО г. Зеленогорск, а также проведена оценка регулирующего воздействия ТОСЭР на социально-экономическое развитие ЗАТО атомной отрасли [19]. В рамках реализованных проектов были решены следующие задачи [20]:

- определены перспективные виды экономической деятельности резидентов ТОСЭР ЗАТО атомной отрасли;
- сформирован перечень потенциальных инновационных проектов, претендующих на получение статуса резидента ТОСЭР ЗАТО атомной отрасли;
- детально описана инфраструктура, необходимая для формирования ТОСЭР ЗАТО атомной отрасли;
- определена оптимальная модель управления ТОСЭР, в том числе схема взаимодействия основных

интересантов и описание функционала управляющей компании;

– подготовлен проект постановления Правительства Российской Федерации о создании ТОСЭР ЗАТО атомной отрасли.

В результате проведенной работы были получены следующие практические результаты:

- разработаны три концепции формирования ТОСЭР ЗАТО г. Железногорск, г. Зеленогорск и г. Саров (в настоящее время ТОСЭР уже сформирована и начала свою деятельность);
- произведена оценка минимального объема капитальных вложений потенциальных резидентов ТОСЭР для запуска инновационных проектов;
- описана инфраструктура ТОСЭР (земельные участки, объекты транспортной, энергетической, коммунальной, инженерной, социальной, инновационной и иных инфраструктур);
- разработаны прогнозы социально-экономических последствий создания ТОСЭР ЗАТО атомной отрасли;
- разработаны проекты нормативно-правовых документов о формировании ТОСЭР на территории ЗАТО;
- разработаны дорожные карты и планы запусков ТОСЭР ЗАТО г. Железногорск, г. Зеленогорск, г. Саров, включая описание необходимых изменений в нормативно-правовые акты;
- подготовлено описание функционала управляющей компании ТОСЭР.

Система управления инновационной деятельностью в Российской Федерации продолжает совершенствоваться. За счёт действующего алгоритма сопровождения инновационных проектов устраняются межведомственные барьеры, гармонизируется нормативно-законодательная база, наращивается кадровый и управленческий потенциал (рис. 3) [13].

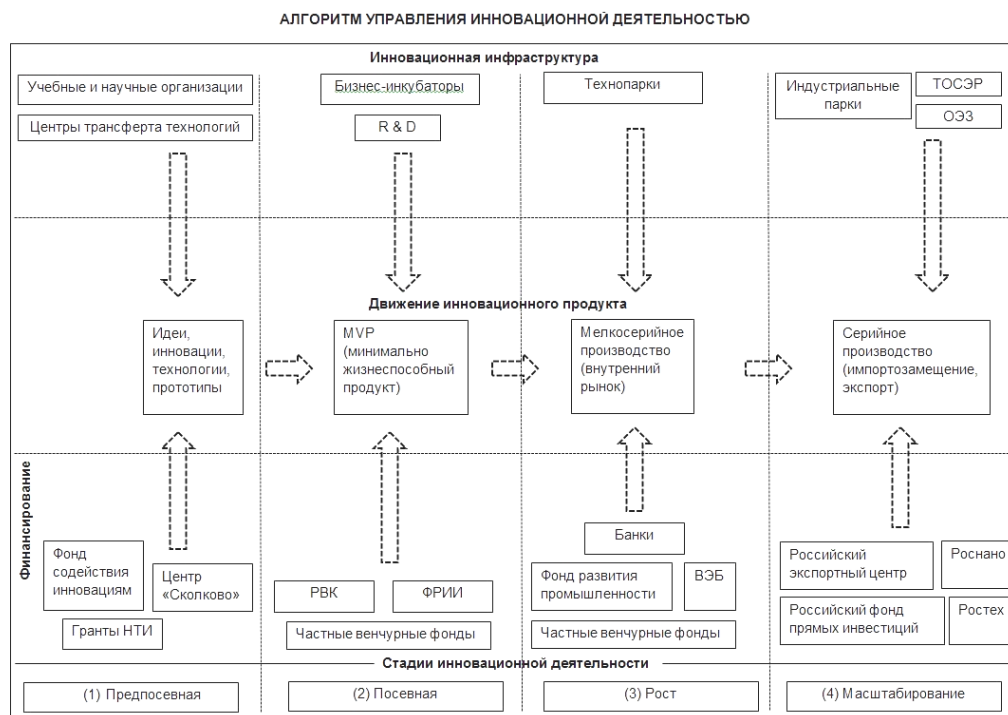


Рис. 3. Алгоритм управления инновационной деятельностью

Fig. 3. Control algorithm of innovative activities

Представленный алгоритм логически выстраивает взаимодействие различных механизмов финансирования инновационных проектов на всех его стадиях – от идеи до серийного производства в рамках существующей инновационной инфраструктуры. Это позволяет избежать как дублирования схожих функций институтов развития Российской Федерации, так и существенного сокращения временных и финансовых издержек при реализации инновационных проектов с использованием проектного подхода.

Однако необходимо отметить, что в научных разработках отечественных и зарубежных ученых проблемы проектного управления инновационной деятельностью с учетом специфики инновационного развития ЗАТО освещены не в полной мере. Особенности организационно-правового статуса ТОСЭР оказывают существенное влияние на развитие инновационной деятельности, что обуславливает необходимость уточнения понятия «проектное управление инновационной деятельностью в ТОСЭР».

В этой связи авторами предложено определение проектного управления инновационной деятельностью в территориях опережающего социально-экономического развития, а именно: вид управленческой деятельности, определяющий согласованную работу органов государственного управления, органов местного самоуправления и представителей бизнеса по созданию льготных режимов ведения инновационной деятельности в территориях опережающего социально-экономического развития, учитывающий интересы их резидентов, государства, региона и муниципального сообщества и обеспечивающий рациональное использование бюджетных ресурсов.

Данное определение содержит важные уточнения:

- учитывается специфика организационно-правовой формы ТОСЭР в условиях ЗАТО;
- определяются условия для финансирования инновационной деятельности, влияющие на привлекательность территории для инвесторов;
- обеспечивается сочетание интересов власти, бизнеса и общества, определяющее перспективы развития ТОСЭР в условиях ЗАТО;
- обеспечивается рациональное использование ресурсов бюджетов всех уровней бюджетной системы в условиях их ограниченности.

Предложенный подход к управлению инновационной деятельностью в ТОСЭР дополняет имеющиеся научные разработки отечественных и зарубежных ученых в области региональной экономики и позволяет сформировать систему согласованных действий органов власти всех уровней с учётом использования ими инструментов проектного управления.

Заключение. Анализ функционального и процессного управления инновационной деятельностью в ТОСЭР позволяет сделать вывод, что использование проектного подхода – успешно. Более того, проектное управление позволяет реализовывать достаточно сложные проекты в сжатые сроки и при имеющихся ограничениях в ресурсах, в первую очередь, финансовых.

Вместе с тем необходимо отметить, что система проектного управления инновационной деятельно-

стью в территориях данного типа требует скорейшего решения следующих важнейших задач [13]:

1. Гармонизация нормативно-правовой базы в области инновационной деятельности в соответствии с международными стандартами и практиками.
2. Обеспечение стабильного и ритмичного финансирования реализации инновационных проектов и совершенствование механизмов комплексного сопровождения реализуемых проектов.
3. Опережающее развитие уровня подготовки и международной сертификации кадров для структур проектного управления на различных уровнях.
4. Дальнейшее развитие инфраструктуры поддержки инновационной деятельности и повышения эффективности работы институтов развития.

Разработка системы проектного управления инновационной деятельностью в ТОСЭР с учетом их специфики позволит существенно сократить сроки формирования ТОСЭР в регионах Российской Федерации (включая ЗАТО и моногорода), улучшить качество планирования создания необходимой инфраструктуры, повысить эффективность деятельности управляющей компании ТОСЭР, а также добиться значительного сокращения расходования выделяемых на эти цели финансовых средств (что особенно важно в условиях дефицита средств федерального и региональных бюджетов).

При создании целостной системы проектного управления инновационной деятельностью в ТОСЭР необходимо преодолеть не только межведомственную разрозненность, но и разбалансированность и несогласованность действий органов исполнительной власти всех уровней, а также устранить все ограничения нормативно-законодательного характера и опережающими темпами подготовить необходимые квалифицированные кадры в области проектного управления.

Библиографические ссылки

1. Гнедых В. А. Что такое корпоративная система управления проектами и зачем она нужна компании [Электронный ресурс] // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 4, ч. 4. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2015/04/52665> (дата обращения: 09.08.2017).
2. Connect: project management system [Электронный ресурс]. URL: <http://www.projectsmanagementsystem.com/project-management.htm> (дата обращения: 09.08.2017).
3. ГОСТ Р 54869–2011. Проектный менеджмент. Требования к управлению проектами. М. : Стандартинформ, 2011. 14 с.
4. PMBoK (Project Management Body of Knowledge) – Свод правил по управлению проектами PMBoK Guide 4th Edition (Project Management Body of Knowledge). 4-е изд. / PMI. М., 2010. 496 с.
5. Милошевич Д. Набор инструментов для управления проектами. М. : Компания АйТи : ДМК Пресс. 2008. 729 с.
6. Аврамчикова Н. Т., Чистякова Н. О. Перспективы развития кластера инновационных технологий

ЗАТО г. Железнодорожск Красноярского края : монография. Красноярск, 2016. 120 с.

7. Грей К. Ф., Ларсон Э. У. Управление проектами. М. : Дело и сервис, 2003. 528 с.

8. Т. ДеМарко, Т. Листер. Человеческий фактор: успешные проекты и команды. 2-е изд. Символ-Плюс, 2007. 256 с.

9. О территориях опережающего социально-экономического развития в Российской Федерации : федер. закон Российской Федерации от 29 декабря 2014 г. № 473-ФЗ [Электронный ресурс]. URL: <http://rg.ru/2014/12/31/territorii-dok.html> (дата обращения: 09.08.2017).

10. Территории опережающего социально-экономического развития: вопросы теории и практики : материалы I Всерос. науч.-практ. конф. (2 марта 2017, г. Казань). Казань : Познание, 2017. 310 с.

11. Особые экономические зоны и другие территории со специальным статусом: некоторые важные результаты и показатели 2016 года [Электронный ресурс] // Официальный портал Правительства Российской Федерации. URL: <http://government.ru/info/27260/> (дата обращения: 10.08.2017).

12. О предварительных результатах работы по созданию территорий опережающего социально-экономического развития на Дальнем Востоке в 2015–2017 годах [Электронный ресурс] // Официальный портал Правительства Российской Федерации. URL: <http://government.ru/news/27554/> (дата обращения: 10.08.2017).

13. Заседание президиума Совета при Президенте Российской Федерации по модернизации экономики и инновационному развитию России [Электронный ресурс]. Великий Новгород, 18.07.2017 г. URL: <http://government.ru/news/28483/> (дата обращения: 10.08.2017).

14. Проектный офис Правительства Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: <http://government.ru/department/361/events/> (дата обращения: 10.08.2017).

15. Проектный офис Национальной технологической инициативы (НТИ) [Электронный ресурс] <http://www.rvc.ru/nti/> (дата обращения: 10.08.2017).

16. АО «АТОМ-ТОР»: управляющая компания территорий опережающего развития ЗАТО атомной отрасли [Электронный ресурс]. URL: <http://atomtor.ru> (дата обращения: 10.08.2017).

17. Проектное управление Правительства Красноярского края [Электронный ресурс]. URL: <http://www.krskstate.ru/project> (дата обращения: 10.08.2017).

18. Структура администрации ЗАТО г. Железнодорожск Красноярского края [Электронный ресурс]. URL: http://www.admk26.ru/administratsiya/struktura/ekonomika_i_finansy/upravlenie_ekonomiki_i_planirovaniya (дата обращения: 10.08.2017).

19. Официальный портал Государственной корпорации «Росатом» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rosatom.ru/> (дата обращения: 10.08.2017).

20. Аналитическое и организационное сопровождение по формированию территории опережающего социально-экономического развития (ТОСЭР) в ЗАТО атомной отрасли [Электронный ресурс]. URL: <http://>

csr-nw.ru/projects/2015/tor_zato/ (дата обращения: 10.08.2017).

References

1. Gnedyh V. A. [What is the corporate system of project management and why the company needs it]. *Sovremennye nauchnye issledovaniya I innovacii*. 2015, No. 4, Part 4. (In Russ.). Available at: <http://web.snauka.ru/issues/2015/04/52665> (accessed 09.08.2017).

2. Connect: project management. Available at: <http://www.projectsmanagementsystem.com/project-management.htm> (accessed 09.08.2017).

3. GOST R 54869–2011. *Proektny menedzhment. Trebovaniya k upravleniyu proektami* [State Standard R 54869–2011 Project management. Requirements for project management]. Moscow, Standartinform Publ., 2011, 14 p.

4. PMBOK (Project Management Body of Knowledge) – PMBOK Guide 4th Edition [Project Management Body of Knowledge]. Moscow, PMI. 2010, 496 p.

5. Miloshevich D. *Nabor instrumentov dly upravleniya proektami* [A set of tools for project management]. Moscow, IT company & DMC Press Publ., 2008, 729 p.

6. Avramchikova N. T., Chistyakova N. O. *Perspektivy razvitiya klastera innovatsionnykh tekhnologiy ZATJ g. Zheleznogorsk Krasnoyarskogo kraya* [Prospects of development of a cluster of innovative technologies of ZATO Zheleznogorsk of Krasnoyarsk region]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2016, 120 p.

7. Grey C. F., Larson E. W. *Upravlenie proektami* [Project management: the managerial process]. Moscow, Delo i service Publ., 2003, 528 p.

8. DeMarco T. *Peopleware: productive projects and teams*. 2th Edition, “Simvol-Plus” Publ., 2007, 256 p.

9. Federal law of the Russian Federation of 29 December 2014 N 473-FZ “On territories of priority socio-economic development in the Russian Federation” (In Russ.). Available at: <http://www.rg.ru/2014/12/31/territorii-dok.html> (accessed 09.08.2016).

10. Territories of advanced socio-economic development: issues of theory and practice: materials of the 1st All-Russian Scientific and Practical Conference, March 2, 2017 – Kazan: “Poznanie” Publishing House of the Kazan Innovation University named after V. G. Timiryasova (IEPE), 2017, 310 p.

11. [Special economic zones and other territories with special status: some important results and indicators of 2016]. *Official site of the Government of the Russian Federation*. Available at: <http://government.ru/info/27260/> (accessed 10.08.2016).

12. [On preliminary results of the work on creation of territories for outstripping social and economic development in the Far East in 2015–2017]. *Official site of the Government of the Russian Federation*. Available at: <http://government.ru/news/27554/> (accessed 10.08.2016).

13. [Meeting of the Presidium of the Council under the President of the Russian Federation on Economic Modernization and Innovative Development of Russia. Velikiy Novgorod]. 18.07.2017. *Official site of the Government of the Russian Federation*. Available at: <http://government.ru/news/28483/> (accessed 10.08.2016).

14. [Project office of the Government of the Russian Federation]. *Official site of the Government of the Russian Federation*. Available at: <http://government.ru/department/361/events/> (accessed 10.08.2016).

15. *Proektny ofis Natsional'noy tekhnologicheskoy initsiativy* [Project office of the National technology initiative (NTI)]. Available at: <http://www.rvc.ru/nti/> (accessed 10.08.2016).

16. *AO "Atom-TOR": upravlyayushaya kompaniya TOSER v ZATO atomnoy otrasli* [JSC "ATOM-TOR": the operating company of TOSER in ZATO of nuclear industry]. Available at: <http://atomtor.ru> (accessed 10.08.2016).

17. *Proektny ofis Pravitel'stva Krasnoyarskogo kraya* [Project office of the Krasnoyarsk Region Government]. Available at: <http://www.krskstate.ru/project> (accessed 10.08.2016).

18. *Struktura Administratsii ZATO Zheleznogorsk Krasnoyarskogo kraya* [The structure of the Administration ZATO Zheleznogorsk of Krasnoyarsk region]. Available at:

http://www.admk26.ru/administratsiya/struktura/ekonomika_i_finansy/upravlenie_ekonomiki_i_planirovaniya (accessed 10.08.2016).

19. Official site of the state Corporation ROSATOM. Available at: <http://www.rosatom.ru/> (accessed 10.08.2016).

20. *Analiticheskoe i organizatsionnoe soprovozhdenie formirovaniya TOSER v ZATO atomnoy otrasli* [Analytical and organizational support for the formation TOSER in the ZATO of nuclear industry]. Available at: http://csr-nw.ru/projects/2015/tor_zato/ (accessed 10.08.2016).

© Аврамчикова Н. Т., Данильченко Ю. В.,
Пучкин М. Б., 2017

КОММЕРЦИАЛИЗАЦИЯ ИННОВАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА ПРЕДПРИЯТИЙ ОБОРОННО-ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА: ФОРМЫ И МЕТОДЫ СЕТЕВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ОБЪЕКТАМИ ИННОВАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Ю. В. Ерыгин, Е. В. Борисова*

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: borisovaev2015@mail.ru

Определена роль инновационной инфраструктуры в решении задач коммерциализации инновационного потенциала предприятий оборонно-промышленного комплекса (ОПК). Рассмотрено формирование механизма коммерциализации инновационного потенциала предприятий ОПК, суть которого заключается в выстраивании сетевого взаимодействия между объектами инновационной инфраструктуры, включая объекты рыночной, инвестиционно-финансовой инфраструктуры национального и международного уровня, и предприятиями ОПК, обладающими уникальными элементами инновационного потенциала, вовлечение которых в коммерческий оборот позволяет в полной мере осуществить коммерциализацию инновационных продуктов, технологий, услуг. Построение сетевого взаимодействия предприятий ОПК и объектов инновационной инфраструктуры в процессе коммерциализации основано на объединении их усилий и увязывании в единую цепочку на основе взаимной заинтересованности для достижения общих конечных результатов реализации инновационных проектов. Предложены критерии выбора форм сетевого взаимодействия: характер взаимодействия объектов инновационной инфраструктуры, достаточность ресурсов для реализации бизнес-процессов. Разработан метод выбора форм сетевого взаимодействия объектов инновационной инфраструктуры, обеспечивающий достижение минимальных затрат при реализации портфелей бизнес-процессов и снижение рисков функционирования объектов инновационной инфраструктуры. Использование предложенных организационных форм сетевого взаимодействия позволяет вовлечь государство, банки, инновационные фонды и объекты инновационной инфраструктуры, участвующие в распределении рисков реализации портфелей бизнес-процессов инновационных проектов между всеми участниками сетевого взаимодействия, что способствует диверсификации рисков и позволяет рассматривать организационное взаимодействие как один из способов снижения инновационных рисков, возникающих в процессе коммерциализации инновационного потенциала предприятий ОПК. Предложенные инструменты построения сетевого взаимодействия объектов инновационной инфраструктуры могут быть использованы федеральными и региональными органами власти при разработке направлений дальнейшего развития и повышения эффективности функционирования инновационной инфраструктуры регионов, а также всех участников процесса коммерциализации в целом.

Ключевые слова: оборонно-промышленный комплекс, коммерциализация инновационного потенциала, инновационная инфраструктура, сетевое взаимодействие, организационные формы построения сетевого взаимодействия, критерии выбора форм, риски.

Ключевые слова: ТОСЭР, проект, проектное управление, проектный офис, инновационная деятельность.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 3, P. 673–679

COMMERCIALIZATION INNOVATIVE POTENTIAL OF DEFENSE INDUSTRY ENTERPRISES: FORMS AND METHODS OF NETWORK INTERACTION WITH OBJECTS OF INNOVATIVE INFRASTRUCTURE

Yu. V. Erygin, E. V. Borisova*

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: borisovaev2015@mail.ru

The role of innovative infrastructure in the solution of problems of commercialization of innovative capacity of the enterprises of the defense industry complex in the article is defined. The article is devoted to the formation of the mechanism of commercialization of innovative capacity of defense industry enterprises. The essence of this mechanism consists of forming of network interaction between objects of innovative infrastructure and defense industry enterprises which possess unique elements of innovative potential. These objects of innovative infrastructure include objects of market, investment and financial infrastructure of national and international level. Involvement of objects of innovative

infrastructure and defense industry enterprises in a commercial turnover allows carrying out fully commercialization of innovative products, technologies, services. Creation of network interaction of defense industry enterprises and objects of innovative infrastructure is based on combination of their efforts and coordination in the uniform chain. This association is carried out on the basis of mutual interest for achievement of the general end results of implementation of innovative projects in the course of commercialization. Criteria of the choice of forms of network interaction are offered: the nature of interaction of objects of innovative infrastructure, sufficiency of resources for realization of business processes. The method of the choice of forms of network interaction of objects of innovative infrastructure is developed. This method provides achievement of the minimum expenses at realization of portfolios of business processes and decrease in risks of functioning of objects of innovative infrastructure. The use of the offered organizational forms of network interaction allows involving the state, banks, innovative funds and objects of innovative infrastructure. It participates in the distribution of risks of realization of portfolios of business processes of innovative projects between all participants of network interaction. It promotes diversification of risks and allows considering organizational interaction as one of the ways of decrease in the innovative risks arising in the course of commercialization of innovative capacity of defense industry enterprises. The author's instruments of creation of network interaction of objects of innovative infrastructure can be used by federal and regional authorities when developing the directions of further development and increase in efficiency of functioning of innovative infrastructure of regions and also all participants of process of commercialization in general.

Keywords: defense industry complex, commercialization of innovative potential, innovative infrastructure, network interaction, organizational forms of creation of network interaction, criteria of the choice of forms, risks.

Введение. Сегодня важнейшим направлением инновационного развития страны является коммерциализация инновационного потенциала высокотехнологичных отраслей экономики, к числу которых относится оборонно-промышленный комплекс (ОПК), обладающий существенным инновационным потенциалом его предприятий.

Эффективное использование имеющегося инновационного потенциала предприятий ОПК требует решения задачи его коммерциализации, что может стать основой как для его воспроизводства в целях обеспечения обороноспособности страны, устойчивости и стратегической конкурентоспособности предприятий ОПК, так и для развития экономики регионов размещения предприятий ОПК, что определяет актуальность темы исследования настоящей статьи.

Вовлечение инновационного потенциала предприятий ОПК в процесс коммерциализации увеличивает их шансы на участие в реализации государственного оборонного заказа за счет получения дополнительных источников финансирования.

В силу своей специфичности и уникальности сформированных компетенций предприятия ОПК не имеют опыта работы на международных рынках сбыта инновационной высокотехнологичной продукции, что актуализирует проблему обеспечения устойчивого конкурентного преимущества предприятий ОПК, которое может достигаться через вовлечение в коммерческий оборот не только инновационного потенциала самих предприятий ОПК, но и других субъектов инновационной деятельности, важнейшими из которых являются объекты инновационной инфраструктуры.

В этой связи коммерциализации инновационного потенциала предприятий ОПК в значительной степени способствует формирование инновационной инфраструктуры, обладающей компетенциями работы в рыночных условиях и создающей условия для эффективной реализации региональных инновационных проектов, включая проекты коммерциализации инновационного потенциала предприятий ОПК.

Заинтересованность региона в его инновационном развитии, а также отсутствие у предприятий ОПК опыта практической работы на рынках высокотехнологичной продукции, механизмов и ресурсов, необходимых для решения задач коммерциализации инновационного потенциала предприятий ОПК, определили роль региональной инновационной инфраструктуры в инновационном развитии страны.

На объекты региональной инновационной инфраструктуры могут быть возложены как функции по реализации отдельных бизнес-процессов самого инновационного проекта, так и функции, связанные с продвижением на рынок и финансированием разработок, а также стимулированием инновационной деятельности.

Таким образом, без вовлечения в процесс коммерциализации других субъектов инновационной деятельности, в первую очередь, имеющих компетенции и опыт работы в рыночных условиях, важнейшими из которых являются объекты инновационной инфраструктуры, включая расположенные в регионах размещения предприятий ОПК, осуществить коммерциализацию инновационной высокотехнологичной продукции, работ, услуг, технологий в полной мере не представляется возможным.

Комплексная реализация процесса коммерциализации инновационного потенциала предприятий ОПК должна строиться на основе использования организационных форм взаимодействия, объединяющих усилия всех участников процесса коммерциализации и повышающих заинтересованность в конечном результате реализации инновационных проектов.

В этой связи суть механизма коммерциализации инновационного потенциала предприятий ОПК заключается в выстраивании сетевого взаимодействия между объектами инновационной инфраструктуры и предприятиями ОПК, обладающими элементами инновационного потенциала и компетенциями, без вовлечения которых в коммерческий оборот нельзя в полной мере осуществить комплексную реализацию процесса коммерциализации инновационного потенциала предприятий ОПК.

Формирование сетевого взаимодействия как определяющей формы сотрудничества в научно-технической и инновационной сфере рассматривается в трудах многих исследователей, в частности в [1–10].

Вместе с тем до настоящего времени недостаточно разработанными остаются вопросы формирования архитектуры инновационной инфраструктуры региона с учетом специфики его инновационного развития, определяемой характером и особенностями реализуемых инновационных проектов, в частности, проектов коммерциализации инновационного потенциала предприятий ОПК. Недостаточное внимание также уделено вопросам выбора форм и разработки механизмов формирования сетевого взаимодействия между объектами инновационной инфраструктуры и другими субъектами инновационной деятельности в процессе реализации инновационных проектов.

Концептуальный подход и инструменты формирования инновационной инфраструктуры региона. В опубликованных ранее работах [11] авторами настоящей статьи был разработан концептуальный подход к формированию инновационной инфраструктуры региона, учитывающий инновационный потенциал территории, характер и условия коммерциализации инновационного потенциала предприятий ОПК, а также специфику их деятельности.

Важнейшим отличием авторского подхода к формированию инновационной инфраструктуры в регионе является предложение осуществлять декомпозицию инновационного проекта на бизнес-процессы, что позволит задействовать существующий в регионе экономический и инновационный потенциал, а также учесть условия реализации бизнес-процессов [11] за счет обеспечения максимального вовлечения в их реализацию субъектов инновационной деятельности, формирующих инновационную инфраструктуру региона, включая как функционирующие в регионе, так и объекты инвестиционно-финансовой, рыночной инфраструктуры, в том числе объекты инновационной инфраструктуры национального и международного уровней, создающие условия для эффективной реализации инновационных проектов.

Для реализации концептуального подхода авторами была разработана матрица распределения бизнес-процессов инновационных проектов региона по объектам инновационной инфраструктуры (матрица РБПИП) [11], использование которой в рамках одного инновационного проекта позволяет сформировать сетевое взаимодействие заинтересованных в успешной его реализации объектов инновационной инфраструктуры.

В процессе реализации общего инновационного проекта объекты инновационной инфраструктуры реализуют цепочку бизнес-процессов инновационного проекта, постепенно переходя от одного объекта инновационной инфраструктуры к другому, формируя единую сеть взаимозависимых объектов инновационной инфраструктуры, объединенных в различных организационных формах для реализации общего инновационного проекта на основе взаимной заинтересованности.

При осуществлении всей совокупности региональных инновационных проектов матрица позволяет сформировать для каждого объекта инновационной инфраструктуры портфель заказов, состоящий из совокупности бизнес-процессов инновационных проектов региона [11].

Таким образом, авторский концептуальный подход определяет необходимость формирования объектов инновационной инфраструктуры с учетом состава и особенностей реализации инновационных проектов, реализуемых на территории, а также необходимости построения сетевого взаимодействия объектов инновационной инфраструктуры в различных организационных формах.

Организационные формы построения сетевого взаимодействия объектов инновационной инфраструктуры. Построение сетевого взаимодействия предприятий ОПК и объектов инновационной инфраструктуры в процессе коммерциализации основано на объединении их усилий и увязывании в единую цепочку на основе взаимной заинтересованности для достижения общих конечных результатов реализации инновационных проектов.

В сетевое взаимодействие вовлекаются объекты инвестиционно-финансовой и рыночной инфраструктуры, что позволяет обеспечить формирование спроса на инновационную продукцию, повысить эффективность реализации завершающих стадий инновационного процесса, привлечь дополнительные источники финансирования для реализации инновационных проектов [11, С. 460] и определяет отличие предлагаемого авторами механизма построения сетевого взаимодействия.

Построение сетевого взаимодействия объектов инновационной инфраструктуры предлагается осуществлять в организационных формах, основанных:

- на объединении ресурсов: консорциум (К), простое товарищество (ПТ);
- долевом участии в реализации инновационных проектов: АО, ООО;
- кооперационных и хозяйственных связях: хозяйственное партнерство (ХП).

Инновационный консорциум чаще всего рассматривается как успешная форма кооперации, в том числе в приобретении патентов, лицензий, ноу-хау и разделении издержек на НИОКР. Данная организационная форма сетевого взаимодействия носит временный характер, создается на период реализации инновационного проекта путем объединения ресурсов для достижения общей цели.

Простое товарищество – это форма объединения усилий в форме вкладов и совместных действий двух и более индивидуальных предпринимателей и (или) коммерческих организаций без образования юридического лица в целях получения прибыли [12].

Хозяйственные партнерства как организационно-правовая форма в России появились относительно недавно – 03.12.2011 г. [13]. Хозяйственным партнерством признается созданная двумя или более лицами коммерческая организация, управление деятельностью которой осуществляют участники партнерства,

а также иные лица в пределах и в объеме, предусмотренных соглашением об управлении партнерством.

Изначально хозяйственные партнерства создавались для реализации рискованных (венчурных) бизнес-проектов как промежуточное звено между наукой и промышленностью на тех стадиях инновационного процесса, где инновационная деятельность имеет наивысшую степень риска. Однако в российской практике данная организационная форма не нашла должного применения.

На практике становится возможным использовать данную форму для объединения объектов инновационной инфраструктуры для выполнения бизнес-процессов при реализации инновационных проектов на более поздних стадиях реализации, где деятельность объектов инновационной инфраструктуры имеет минимальный риск и существует совершенная определенность получения ими коммерческого результата от их участия в партнерстве за счет отсутствия сомнения в завершении реализации инновационного проекта.

Весомым преимуществом хозяйственного партнерства является обеспечение наибольшей мотивации взаимной заинтересованности всех объектов инновационной инфраструктуры – участников партнерства в коммерческих результатах реализации инновационных проектов.

Объединение ресурсов также возможно в формах, основанных на долевом участии в реализации инновационных проектов на постоянной основе (АО, ООО). Коммерческий результат реализации инновационных проектов распределяется пропорционально долям участников в уставном капитале общества.

Критерии и методы выбора форм сетевого взаимодействия. Предложенные авторами организационные формы сетевого взаимодействия имеют отличительные особенности, определяющие систему критериев, обосновывающих их выбор:

- характер взаимодействия объектов инновационной инфраструктуры (постоянный или единовременный);
- достаточность ресурсов для реализации бизнес-процессов.

Метод выбора форм сетевого взаимодействия на основе предложенных критериев представлен матрицей на рис. 1.

В условиях недостаточности ресурсов для реализации портфелей бизнес-процессов и единовременного характера взаимодействия объектов инновационной инфраструктуры для реализации портфелей бизнес-процессов проектов коммерциализации инновационного потенциала (рис. 1. квадрант I) экономически нецелесообразно вкладывать капитал на постоянной основе, например, делать вклад в уставный капитал. В связи с этим необходимо привлечение дополнительных ресурсов на временной основе, что определяет выбор таких форм сетевого взаимодействия, как консорциум (К) и простое товарищество (ПТ).

Недостаточность ресурсов при постоянном характере взаимодействия (квадрант III) для реализации портфелей бизнес-процессов определяет выбор форм, основанных на долевом участии (АО, ООО).

Если ресурсов для реализации портфелей бизнес-процессов достаточно, необходимо решение задачи по снижению затрат, связанных с их реализацией, за счет вовлечения ресурсов других участников в реализацию проектов коммерциализации инновационного потенциала. В этом случае сетевое взаимодействие создается для решения конкретной задачи по снижению затрат, связанных с реализацией портфелей бизнес-процессов, и носит единовременный характер, а форма его построения основана на кооперационных связях (квадрант II).

В условиях достаточности ресурсов и постоянном характере взаимодействия объектов инновационной инфраструктуры (квадрант IV), участники реализуют портфели бизнес-процессов, получая доходы за результаты совместной деятельности, уровень которых определяет эффективность их реализации и, в конечном счете, эффективность сетевого взаимодействия.

В этом случае однозначно принять решение по выбору той или иной формы их сетевого взаимодействия не представляется возможным.

Уровень доходов оказывает влияние на коммерческую состоятельность объектов инновационной инфраструктуры, а их получение сопряжено с рисками функционирования объектов инновационной инфраструктуры.

В связи с этим для выбора организационных форм сетевого взаимодействия при достаточности ресурсов и постоянном характере взаимодействия в качестве дополнительных критериев авторами предложены риски и эффективность реализации портфелей бизнес-процессов, представленные в таблице.

Риск реализации портфелей бизнес-процессов считается высоким, если величина потерь, вызванных риском (З), не компенсируется запасом финансовой прочности (ЗФП), т. е. $Z \geq \text{ЗФП}$. При этом запас финансовой прочности позволяет компенсировать риски выполнения финансовых обязательств объектами инновационной инфраструктуры при реализации портфелей бизнес-процессов и, тем самым, обеспечить им финансовую устойчивость.

Эффективность, выраженная показателем рентабельности продаж (R), считается высокой, если ее расчетная величина превышает среднеотраслевой уровень ($R_{\text{ср отп}}$), который по итогам, например, 2015 г. составил 8,2 %, в 2016 г. среднеотраслевой уровень снизился до 7,4 % [14].

Возникновение высоких рисков определяет необходимость их снижения посредством диверсификации, т. е. распределения как между инновационными предприятиями и объектами инновационной инфраструктуры, так и между объектами инновационной инфраструктуры в процессе реализации портфелей бизнес-процессов инновационных проектов. Выбор форм сетевого взаимодействия, основанного на условиях достаточности ресурсов и постоянном характере взаимодействия, по дополнительным критериям предлагается осуществлять на основе матрицы 2, представленной на рис. 2.



Рис. 1. Матрица 1 выбора форм сетевого взаимодействия (разработана авторами)

Fig. 1. A matrix 1 of the choice of forms of network interaction (developed by the authors)

Критерии выбора форм сетевого взаимодействия объектов инновационной инфраструктуры

Значение	Потери, вызванные риском, тыс. руб.	Рентабельность продаж, %
Высокий (ая)	$3 \geq 3\text{ФП}$	$R > R_{\text{ср.отр}}$
Низкий (ая)	$3 \leq 3\text{ФП}$	$R < R_{\text{ср.отр}}$

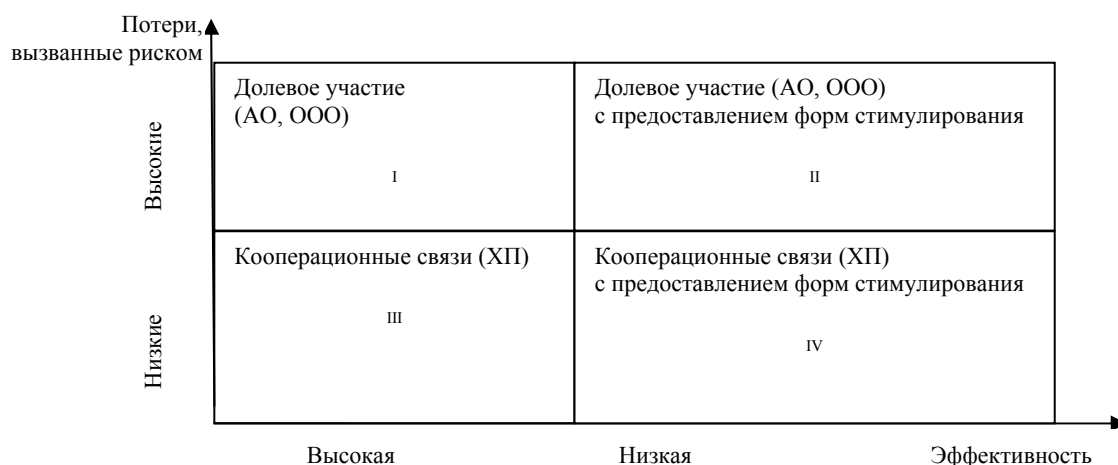


Рис. 2. Матрица 2 выбора форм сетевого взаимодействия при условии достаточности ресурсов и постоянном характере взаимодействия (разработана авторами)

Fig. 2. A matrix 2 of the choice of forms of network interaction under conditions of sufficiency of resources and the constant nature of interaction (developed by the authors)

Высокая эффективность реализации портфелей бизнес-процессов (рис. 2, квадрант I) стимулирует объекты инновационной инфраструктуры вступать во взаимодействие между собой на постоянной основе в форме долевого участия (АО, ООО). При этом высокие риски распределяются между объектами инновационной инфраструктуры пропорционально их вкладам в уставный капитал, что повышает заинтересованность во взаимодействии в процессе совместной реализации инновационного проекта и позволяет рассматривать сетевое взаимодействие как один из способов снижения рисков функционирования объектов инновационной инфраструктуры.

При низком риске и высокой эффективности (квадрант III) сетевое взаимодействие носит парный или групповой характер, а форма его построения основана на кооперационных связях (ХП) между участниками реализации портфелей бизнес-процессов.

При низкой эффективности реализации портфелей бизнес-процессов (квадрант II и IV) независимо от степени риска необходимо привлечение государственного стимулирования с последующей оценкой бюджетной эффективности портфелей бизнес-процессов.

Государственное стимулирование предоставляется с целью повышения заинтересованности участников

процесса коммерциализации в получении конечных результатов реализации инновационных проектов региона. В этой связи авторами предложено осуществлять стимулирование всех участников реализации инновационных проектов, включая как инновационные предприятия, так и объекты инновационной инфраструктуры, принимающие участие в их реализации [15].

Если после получения государственного стимулирования реализация портфелей бизнес-процессов является эффективной для бюджета, соответственно, обеспечивается и эффективность сетевого взаимодействия объектов инновационной инфраструктуры.

Выбор форм сетевого взаимодействия объектов инновационной инфраструктуры далее осуществляется в зависимости от уровня риска. Высокие риски требуют их снижения посредством распределения между объектами инновационной инфраструктуры пропорционально их вкладам в уставный капитал. Соответственно, форма сетевого взаимодействия выбирается в форме долевого участия (АО, ООО). При низком риске сетевое взаимодействие основано на кооперационных связях (ХП).

Если после получения государственного стимулирования реализация портфелей бизнес-процессов является неэффективной для бюджета, необходимо внесение изменений в сетевое взаимодействие посредством механизма обратной связи, предусматривающего проведение новой декомпозиции инновационных проектов и формирование новых портфелей заказов.

Важно отметить, что использование предложенных организационных форм сетевого взаимодействия вовлекает государство, банки и инновационные фонды, предоставляющие государственное стимулирование, в распределение рисков реализации портфелей бизнес-процессов инновационных проектов между участниками сетевого взаимодействия, что способствует диверсификации рисков и позволяет рассматривать организационное взаимодействие как один из способов снижения инновационных рисков.

Снижение рисков по каждому инновационному проекту достигается за счет повышения эффективности сетевого взаимодействия участников его реализации на основе организационных форм сетевого взаимодействия.

Взаимодействие участников реализации инновационных проектов в различных организационных формах повышает эффективность использования инструментов стимулирования.

В свою очередь, распределение стимулирования между всеми участниками реализации инновационного проекта обеспечивает их финансовую устойчивость за счет повышения заинтересованности в получении конечного результата реализации инновационных проектов, включая проекты коммерциализации инновационного потенциала предприятий ОПК.

Заключение. Таким образом, предложенный метод на основе представленных матриц позволяет осуществлять выбор форм сетевого взаимодействия объектов инновационной инфраструктуры, провести укрупненную оценку возможных вариантов построения их сетевого взаимодействия в зависимости от созда-

ваемых в регионе условий, оценить эффективность сетевого взаимодействия, минимизировать затраты и риски, связанные с реализацией портфелей бизнес-процессов, обеспечивая финансовую устойчивость и эффективность функционирования объектов инновационной инфраструктуры, а также всей системы взаимодействия участников процесса коммерциализации в целом.

Благодарности. Статья подготовлена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 17-02-00792.

Acknowledgements. The article is prepared with the financial support of the Russian Federal Property Fund № 17-02-00792.

Библиографические ссылки

1. Басов Н. В. Сети межорганизационных взаимодействий как основа реализации открытых инноваций // Инновации. 2010. № 7. С. 36–46.
2. Болычев О. Н., Волошенко К. Ю. Межорганизационные сетевые формы взаимодействия как определяющая форма научно-технического инновационного сотрудничества России и Европейского союза в Балтийском регионе // Балтийский регион. 2013. № 4 (18). С. 23–39.
3. Дробышевская Л. Н., Кучерук В. А. Оценка эффективности сетевого взаимодействия компаний в регионе // Terra economicus. 2012. Т. 10, № 3. Ч. 2. С. 104–109.
4. Коньшев О. В. Управление организационно-финансовым взаимодействием участников интегрированных субъектов хозяйствования : автореф. дис. ... канд. экон. наук. Орел, 2002. 24 с.
5. Лобок А. М. Сетевое взаимодействие: новый формат или модное название? // Журнал руководителя управления образованием. 2014. № 7. С. 1–8.
6. Неретина Е. А. Типы конфигурации и способы построения межорганизационных сетей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Общественные науки. 2014. Вып. № 2 (30). С. 196–204.
7. Шерешева М. Ю. Формы сетевого взаимодействия компаний. М. : Изд. дом гос. ун-та Высшей школы экономики, 2010. 339 с.
8. Ребязина В. А., Владимиров Ю. Л. Сетевые формы взаимодействия российских компаний в сфере информационно-коммуникационных технологий // Журнал социологии и социальной антропологии. 2012. Т. XV, № 5 (64). С. 281–293.
9. Kogut B. The network as knowledge: Generative rules and the emergence of structure // Strategic Management Journal. 2000. Vol. 21. Pp. 405–425.
10. Moller K., Rajala A., Svahn S. Strategic business nets – their type and management // Journal of Business Research. 2005. Vol. 58, No 9. Pp. 1274–1284.
11. Ерыгин Ю. В., Борисова Е. В. Матрица РБПИП как инструмент формирования архитектуры инновационной инфраструктуры региона // Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 2. С. 458–463.
12. Гражданский кодекс Российской Федерации (часть вторая) от 26.01.1996 № 14-ФЗ [Электронный ресурс]. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_9027/\(дата обращения: 08.09.2017\)](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_9027/(дата обращения: 08.09.2017)).

13. О хозяйственных партнерствах : федер. закон от 03.12.2011 г. № 380-ФЗ [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_122730/ (дата обращения: 08.09.2017).

14. Об утверждении Концепции системы планирования выездных налоговых проверок : приказ ФНС России от 30.05.2007 г. № ММ-3-06/333@ : в ред. от 10.05.2012 г. [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_55729/1e7023fb662a09b71e222c8fcb345b17a8e617d/. и URL:http://www.nalog.ru/rn77/taxation/reference_work/conception_vnp/po_sostoyaniyu_na_05.05.2017 (дата обращения: 05.05.2017).

15. Ерыгин Ю. В., Борисова Е. В. Механизм функционирования инновационной инфраструктуры в процессе коммерциализации инновационного потенциала предприятий ОПК // Экономика и менеджмент систем управления. 2016. № 1.2 (19). С. 227–234.

References

1. Basov N. V. [Network of interorganizational interactions as the basis of realization of open innovations]. *Innovatsii*. 2010, No. 7, P. 36–46 (In Russ.).

2. Bolychev O. N., Voloshenko K. Ju. [Interorganizational network forms of interaction as the defining form of scientific and technical innovative cooperation of Russia and European Union in the Baltic region]. *Baltiyskiy region*. 2013, No. 4 (18), P. 23–39 (In Russ.).

3. Drobyshvskaya L. N., Kucheruk V. A. [The analysis of efficiency of network interaction of the companies in the region]. *Terra economicus*. 2012, Vol. 10, No. 3, Part 2, P. 104–109 (In Russ.).

4. Konyshov O. V. *Upravlenie organizatsionno-finansovym vzaimodeystviem uchastnikov integrirovannykh sub'ektov khozyaystvovaniya: avtoref. diss. kand. ekon. nauk* [Management of organizational and financial interaction of participants of the integrated subjects of managing. Candidate of Economic Sciences. Abstract]. Orel, 2002. 24 p.

5. Lobok A. M. [Network interaction: new format or fashionable name?]. *Zhurnal rukovoditelya upravleniya obrazovaniem*. 2014, No. 7, P. 1–8 (In Russ.).

6. Neretina E. A. [Types configuration and ways of creation of interorganizational networks]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region*.

Obshchestvennye nauki. 2014, No. 2 (30), P. 196–204 (In Russ.).

7. Sheresheva M. Ju. *Formy setevogo vzaimodeystviya kompaniy* [Forms of network interaction of the companies]. Moscow, Izd. dom Gos. un-ta Vysshey shkoly ekonomiki Publ., 2010, 339 p. (In Russ.).

8. Rebyazina V. A., Vladimirov Yu. L. [Network forms of interaction of the Russian companies in the sphere of information and communication technologies]. *Zhurnal sotsiologii i sotsial'noy antropologii*. 2012, Vol. 15, No. 5 (64), P. 281–293 (In Russ.).

9. Kogut B. The network as knowledge: Generative rules and the emergence of structure. *Strategic Management Journal*. 2000, Vol. 21, P. 405–425.

10. Moller K., Rajala A., Svahn S. Strategic business nets – their type and management. *Journal of Business Research*. 2005, Vol. 58, No. 9, P. 1274–1284.

11. Erygin Yu. V., Borisova E. V. [Matrix of “RBPIP” as a tool for the formation of architecture of innovation infrastructure in the region]. *Siberian journal of science and technology*. 2017, Vol. 18, No. 2, P. 458–463 (In Russ.).

12. Civil code of the Russian Federation (part second) of January 26, 1996, No. 14 (In Russ.). Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_9027/ (accessed 08.09.2017).

13. RF Federal Law “About economic partnership” of December 03, 2011, No. 380 (In Russ.). Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_122730/ (accessed 08.09.2017).

14. About the approval of the Concept of system of planning of exit tax audits. Order of Federal Tax Service of the Russian Federation of May 30, 2007, No. ММ-3-06/333@. (In Russ.). Available at http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_55729/1e7023fb662a09b71e222c8fcb345b17a8e617d/ and at http://www.nalog.ru/rn77/taxation/reference_work/conception_vnp/po_sostoyaniyu_na_05.05.2017 (accessed 05.05.2017).

15. Erygin Yu. V., Borisova E. V. [The mechanism of functioning of innovative infrastructure in the course of commercialization of innovative capacity of defense industry enterprises]. *Ekonomika i menedzhment sistem upravleniya*. 2016, No. 1.2 (19), P. 227–234 (In Russ.).

SOCIAL AND ECONOMIC POLICY OF KRASNOYARSK TERRITORY AS A REGION OF INNOVATIVE DEVELOPMENT

E. N. Sochneva^{1*}, E. A. Voronin², D. V. Zyablikov¹

¹Siberian Federal University

79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

² Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: Sochneva.e@inbox.ru

The paper presents the relevance of regional planning. It proves that the innovative way of regional economy development is the most effective at the present stage. Each region follows its own way of innovative development and each one has its own peculiar characteristics. Krasnoyarsk Territory is one of the regions of innovative development, which is proved by various researchers and independent research agencies classifying the regions of Russia on different grounds. Thus, the region with the focus on innovative economic development requires a special social and economic policy, consisting of two aspects - social and economic. Social policy should reproduce human capital as the main factor in the social and economic development of the region. Human capital, in turn, is formed from three interconnected components: reproduction of human resources (demographic policy), their formation and focus vector (employment policy on the labor market) and development of human resources or transformation of human capital into human potential (education policy). For each of the three specified directions, particular recommendations are given within the framework of innovative development. It is necessary, for instance, to introduce a number of benefits that enable mothers to combine their work (study) and their main female function to stimulate the demographic policy. Within the framework of the employment policy, it is proposed to strengthen vocational guidance work to help young people's choice in the labor market. The education system should be made more accessible to all segments of population in order to increase its efficiency and quality. As for creating economic basis for innovative development, various forms of business associations and consolidations, such as strategic scientific alliances, investment public-private partnerships and technology platforms are proposed. Technological platforms can become an effective form of business for Krasnoyarsk Territory, since they will make it possible to use the scientific potential of large universities in the region. The place of small businesses and self-employment in the regional economy of innovative type is defined as an auxiliary infrastructure of large industrial associations in the region.

Keywords: Social and economic policy, region, innovative development, social policy, economic basis, human capital.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 3. С. 680–689

СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ПОЛИТИКА КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ КАК РЕГИОНА ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ

Е. Н. Сочнева^{1*}, Е. А. Воронин², Д. В. Зябликов¹

¹Сибирский федеральный университет

Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79.

²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: Sochneva.e@inbox.ru

Показана актуальность регионального планирования, доказано, что на современном этапе развития экономики инновационный путь развития региональной экономики является наиболее эффективным. Каждый регион проходит путь инновационного развития по-своему, и у каждого есть свои присущие ему особенности. Красноярский край – это один из регионов инновационного развития, что доказывается различными исследователями, классифицирующими регионы России по разным признакам, и независимыми исследовательскими агентствами. Таким образом, край с инновационной направленностью развития экономики требует особенной социально-экономической политики. Она состоит из двух аспектов – социального и экономического. Социальная политика должна воспроизводить человеческий капитал как основной фактор социально-экономического развития региона. Человеческий капитал, в свою очередь, формируется из трех взаимосвязанных компонентов: воспроизводство человеческих ресурсов (демографическая политика), их формирование и придание им вектора направленности (политика занятости на рынке труда) и непосредственно развитие человеческих ресурсов или

превращение человеческого капитала в человеческий потенциал (политика в области образования). По каждому из трех указанных направлений даются конкретные рекомендации в рамках инновационного развития экономики. Так, для стимулирования демографической политики необходимо введение ряда пособий, дающее возможность матерям совмещать работу (учебу) и свою основную женскую функцию. В рамках политики занятости предлагается усиление профориентационной работы для помощи молодежи при самоопределении на рынке труда. Для повышения эффективности системы образования его необходимо делать более доступным для всех слоев населения наряду с ростом качества последнего. В рамках создания экономического базиса для инновационного развития предлагается развивать различные формы объединений и укрупнений бизнеса. Например, стратегические научные альянсы, инвестиционное государственно-частное партнерство и технологические платформы. Для Красноярского края именно технологические платформы могут выступить эффективной формой бизнеса, так как позволят использовать научный потенциал крупных вузов, присутствующих в регионе. Место малого бизнеса и самозанятости в региональной экономике инновационного типа определяется как вспомогательная инфраструктура крупных промышленных объединений в регионе.

Ключевые слова: социально-экономическая политика, регион, инновационное развитие, социальная политика, экономический базис, человеческий капитал.

Introduction. Formation of an effective social and economic policy for the development of regions based on the strategic prospects of the national economic system is one of the most important tasks of public management of territorial development.

The role of social and economic policy of the regions in Russia is growing. The last few years have shown that there is a redistribution of roles between the federal and regional levels in all spheres of social expenditure: the role of the latter in the implementation of the public social policy is steadily growing. According to N. V. Zubarevich, E. A. Gorina regional budgets support was reduced in comparison with 2009. The share of transfers in total revenues of regional budgets has been either stable or declining since 2012 which reflects political priorities of the federal budget expenditures [1]. The idea of regional sovereignty strengthening was also announced at the Gaidar Forum in 2017 during the expert discussion on the New Regional Policy [2].

In the process of decentralization and market liberalization, the growth of diverse ways for the development of samples the regions bear a multiply increased load acting as independent subjects of economic relations, competing for budgetary resources and private investments, responsible for the level and quality of life of population of their region, while implementing intraregional social and economic policy.

Decree of the President of the Russian Federation No. 13 of 16.01.2017 "On the Approval of the Fundamentals of the State Policy of Regional Development of the Russian Federation for the Period until 2025" defines the state policy of regional development as a system of priorities, goals, tasks, measures and actions of the federal public authorities on political, social and economic development of the subjects of the Russian Federation and municipalities.

The objective of this paper is to show features of the social and economic policy of the innovative development region on the example of Krasnoyarsk Territory.

The general vector of regional development. In today's difficult conditions of import substitution, modernization of the economy and transition to an innovative model of regional development has become the only true solution. Firstly, innovations enhance the effectiveness of the current economic system and maintain its stability

in time of a crisis; secondly, any innovation process requires the region to use state-of-the-art achievements in science and technology, as well as to take into account regional infrastructure and policies.

Innovative development of regions is important not only for the subjects of the Russian Federation, but also for the economic and social situation in the country as a whole. Innovation will allow to improve the country from within, creating favorable social and economic conditions for its residents. At the same time, the analysis of the innovative activity in the regions will help to identify problems that might be common throughout Russia. Thus, focusing on innovative development of the regions is the most favorable path for the country development [3; 4].

All the foregoing cause interest in issues of regional social and economic development, taking into account the innovation factor. Many regions have already been using this model. However, each of them implements the innovation development model differently. Krasnoyarsk Territory is one of such regions.

The modern model of a region's innovative development in the world's leading countries is based on the G. Itskovits's approach, which is, in turn, based on close interaction between government, business and universities. The most important conditions for its effective functioning are as follows:

- favorable business climate, both in the country and in the region;
- use of the entrepreneurial model at universities, which assumes the implementation of the basic functions, such as educational, research and entrepreneurial ones;
- availability of both private investor networks and mechanisms for attracting investment in innovative projects; developed infrastructure (technology parks, business incubators, etc.);
- active participation of government, businesses and universities in the innovation process.

Krasnoyarsk Territory as a region of innovative development. According to the classifications of the regions of Russia published by modern researchers, Krasnoyarsk Territory is marked as a rapidly developing region focused on innovation.

For example, classification of regions suggested by S. Zemtsov and V. Barinova is of interest. They offer

a typology of regions and cities to pursue innovation policy [5]. For this purpose they use groups of variables:

- human potential, education and agglomeration effects (measured in terms of the share of employed citizens having higher education, share of students in the population);
- potential for generating new knowledge and technologies (share of the employed in R & D, number of potentially commercialized patents);
- potential for introducing technologies (ratio of used patents to issued patents, share of manufacturing in GRP);
- potential for diffusion of innovations, consumption of information and communication technologies (share of employed in agriculture, level of Internet availability).

In accordance with the above criteria, the following groups of regions are identified: global centres, multifunctional innovation centres, specialized creative regions, acceptive and creative, research and production regions (which include Krasnoyarsk Territory), strongly acceptive middle regions, and weakly acceptive semi-peripheral regions.

It should be noted that the average growth potential has been noted in the group of acceptive and creative regions, but there is a sufficiently high scientific and production potential. In the regions there are strong technical universities and large enterprises, active introduction of new technologies and methods in the manufacturing sectors has been carried out. All this causes the presence of innovative potential for the development of regional economy.

According to Association of Innovative Regions of Russia rating, Krasnoyarsk Territory was among the regions that improved their positions – 11th place in 2011 in comparison with 18th place in 2014. In the sub-rating “Research and Development” Krasnoyarsk Territory took 17th place (in comparison with 22nd position in 2014), in the sub-rating “Innovation activity” it takes 11th position (having advanced from 14th position since 2014) [6].

The presented facts prove that Krasnoyarsk Territory can join the regions of innovative development. In fact, the priority areas for Krasnoyarsk Territory development are creation of innovative infrastructure and support for innovation. To promote these areas in the region an effective system of managing the innovative regional development has been created and an innovation support infrastructure is being formed. Although the innovative development of Krasnoyarsk Territory is at average level for Russia in general, it is, however, quite low compared to the level of developed countries.

At the same time, transformations triggering innovative processes in Krasnoyarsk Territory are allowed by the accumulated social, scientific, educational and innovative potential, resources of the regional management system, and prospects for implementing priority investment projects on the territory of the region, development of inter-regional and international partnerships [7].

According to the list of subjects of the Russian Federation, which are subsidized from the federal budget for integrated investment projects of development of innovative territorial clusters, approved by the Resolution of the Government of the Russian Federation No. 316 of 15.04.2014 “On the Approval of the State Program of the

Russian Federation” Economic Development and Innovation Economy”, Krasnoyarsk Territory is implementing a comprehensive investment project for the development of an innovative technologies cluster of ZATO in Zheleznogorsk.

The innovative technologies cluster has been implemented in accordance with the program of its development approved by the Act of the Government of Krasnoyarsk Territory dated September 20, 2013 N 665-r, and represents the list of activities for implementation of investments in projects to establish new enterprises (organizations) or upgrade the existing ones that have various organizational and legal forms and are registered in Krasnoyarsk Territory and connected cooperatively with the cluster enterprises.

The financial infrastructure for supporting innovations has been implemented by the regional state autonomous institution *Krasnoyarsk Regional Foundation for Science and Scientific and Technical Activities Support* established for the mentioned purposes. The program is being implemented to provide soft loans to innovative companies on the basis of the open joint-stock company Krasnoyarsk Regional Agency for SME Support. In addition, a number of objects of innovative infrastructure are being formed, united in a single logical chain: the regional state autonomous institution *Krasnoyarsk Regional Innovative and Technological Business Incubator* has been established, and the industrial park is being constructed in the closed administrative and territorial entity of Zheleznogorsk.

Regional innovation policy should have a stable economic basis. According to Krasstat, the situation in the industries of Krasnoyarsk Territory was characterized as positive from January to December 2016.

From January to December 2016 the industrial production index amounted to 98.5 % with an average of 101.1 % for Russia. The existing industrial production index is due to changes in the main industrial activities:

- mining – 101.7 % (Russia – 102.5 %); processing industries – 95.3 % (Russia – 100.1 %);

- energy – 101.1 % (Russia – 101.5 %). The output of goods shipped (works, services) as industrial production in current prices decreased to 1,439.8 billion rubles in the reporting period, it amounts to 1.2 % compared to the period from January to December 2015 (1,456.6 billion rubles). The price index of industrial goods producers from January to December 2016 was 102.3 % compared to the period from January to December 2015, including 105.3 % for the domestic market, and 95.6 % for exports [8].

The leading industries of the Krasnoyarsk Territory are ferrous and non-ferrous metallurgy, fuel and energy complex, machine building and metal working, mining, timber, woodworking, pulp and paper, chemical, light and food industries. Over the past year, the overall industrial production index of the region showed a positive upward trend, currently it has reached 125 % to the level of 2014 (fig. 1).

The data in the table shows that the processing industries of the region significantly exceed the extractive industries by gross volume.

The concept of social and economic policy consists of two equivalent terms *social* and *economic*, which, of course, are interconnected.

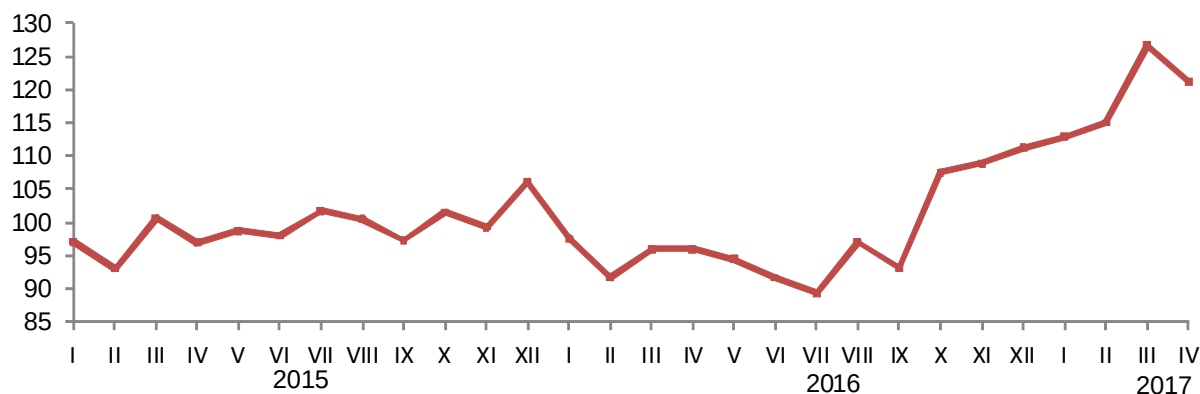


Fig. 1. The industrial production index (percentage of 2014) [8]

Рис. 1. Индекс промышленного производства (в процентах к 2014 году) [8]

The output of locally produced and shipped goods, performed works and services by economic activities (millions of rubles) [18]

Industry sectors	2012	2013	2014	2015	2016
Mining	248580	296844	318766	369692	365273
Processing industries	629581	644297	777413	896235	909626
Electricity, gas and water production and distribution	105701	119348	134338	158168	164936

Economic policy is set around consolidation of business and creation of new business models, as well as the use of the human capital of the region. It should be noted that formation and growth of human capital is the function of social policy in the region.

Social policy of the innovative development region.

Let us consider implementation of the region's social policy of innovative development, the purpose of which is to build human capacity.

The main goal of the social and economic development of Krasnoyarsk Territory is an innovative breakthrough and modernization that are impossible without the growth of human capital to the level of human capacity, for which the scheme for building human potential have been proposed here (fig. 2) [9].

This scheme presents three components that are responsible for human capital growth. It should be noted that for an innovative breakthrough, it is necessary to use all possible human capital or human capacity. The difference in these two terms is the following: *human capital* is the sum of knowledge, skills and habits of all able-bodied citizens in the economy, and *human capacity* is the maximum possible set of the same parameters, which gives the maximum economic effect (in our case it is potential GRP, i. e. the gross regional product). By the way, we shall note that the correct assessment of human capacity through the three specified areas of social policy is conditioned by the fact that the well-known human development index is based on three of these components: literacy (education) assessment, average remaining life-time (the analogue of demographic policy), average gross product size. Full and effective employment of population is one of the factors for achieving this goal, when all the economically active population works, excluding the natural jobless level, and at the same time the human

resource is used effectively. Effectively means that each worker brings the greatest possible result. This is achieved through a well-structured vocational guidance work that helps a person find a profession appropriate to their personal characteristics, as well as all employees should receive the education that is necessary for effective work, and all of them are involved in the economy at full extent.

The task of reproduction and preservation of population is realized through the demographic policy to reduce mortality and increase the birth rate, which is achieved by improving the quality of medical care, material incentives for births, provision of preschool institutions, etc.

At the regional level, it is advisable to introduce additional benefits aimed at protecting maternity. The experience of using such benefits is available in developed countries and in some regions of Russia [10].

For example, for the purposes of innovative development of the economy, it would be important to have a nanny's allowance for working parents whose children are under three years old. Many mothers want to continue their careers and education even after the birth of a child, such benefits will greatly help a single mother. In addition, it will give young women an opportunity to have children, for example, students or those who do not yet have work experience. Such a manual will help increase the human capital of women, who will work for the innovative development of the region's economy.

The policy of employment in conditions of innovative development should be focused not only on the development and implementation of programs to combat unemployment, which is a fight against the investigation, but, more importantly, to create institutional foundations for maximizing involvement and use of human resources for the economy.

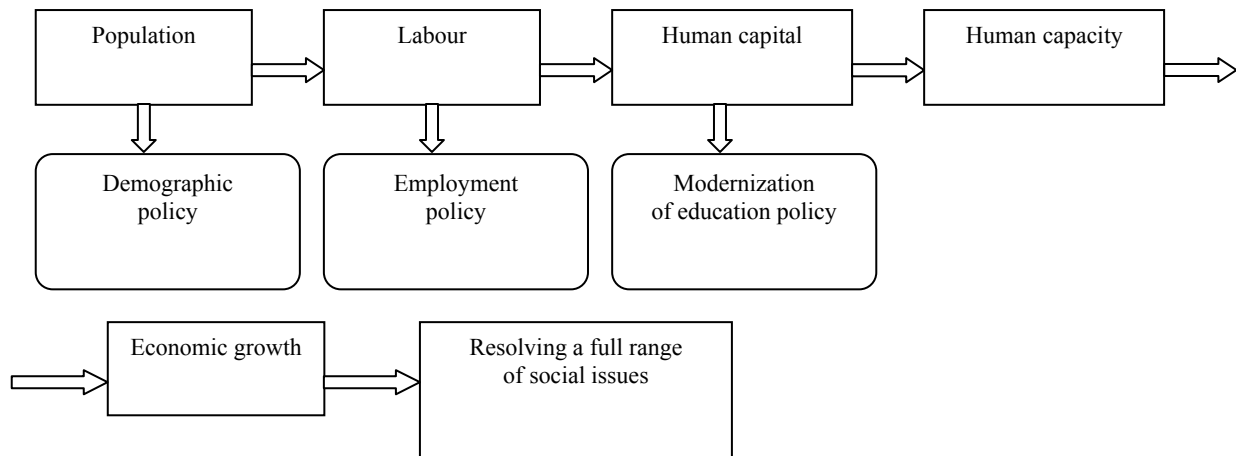


Fig. 2. Formation and growth of human capital through the social policy of the region

Рис. 2. Создание и наращивание человеческого капитала посредством социальной политики региона

In an innovative economy, skilled labor is the main factor of production. According to the Toffler's concept, the world today is on the threshold of critical social changes, technical and cultural innovations [11]. Technological shifts have a dramatic impact on all aspects of social life. The content of labor changes and its productivity increases. The microelectronic revolution and information technologies increase the power of human intellect. In essence, a new civilized way was born, in which the spheres of labor, management and leisure will be fundamentally different.

The main characteristics of the modern employment model include the following:

- displacement of agricultural employment;
- constant reduction of traditional industrial employment;
- development of the service sector and its growing diversification as a source of jobs;
- rapid growth of managerial, professional and technical workplaces;
- relative stability of a significant share of employment in retail trade;
- modernization of professional structure in time;
- increase in the share of knowledge in employers' requirements, which demand a higher qualification and a higher level of education.

There are standard generally accepted measures aimed at combating unemployment and increasing employment. On the Krasnoyarsk Territory, such activities include: promising vocational training for workers who are at risk of being fired; organization of public works, temporary employment of workers who are under dismissal, as well as recognized unemployed citizens and citizens seeking work; internships for graduates in Education gaining work experience; employment of challenged people; promoting self-employment of unemployed citizens and encouraging creation of additional jobs for the employment of unemployed citizens by young businesses; providing targeted support to citizens who applied for employment services, including those to replace jobs created, federal targeted programs and investment projects, etc. [12].

However, all the events presented have some effect in the current period of time, but they do not affect the

indicators and dynamics of the labor market in the long term. They are not connected with the goals and tasks facing the modern economy of innovation, which can lead to a shortage of qualified labor resource for the innovative economy.

One of the significant reasons for the ineffectiveness of measures to combat unemployment is that it is necessary to fight not with the consequence, that is unemployment, but with its causes [13].

Measures on the labor market should be aimed at increasing the individual's capacity for self-determination, increasing responsibility for his future [14].

The need for psychological and information training of younger generation entering the labor market is caused by the established model of social policy in Russia. Socially protected and socially insured (with the participation of trade unions) will be only an individual demanded on the labor market, while the labor market demands knowledge and skills. In addition, the problem of awareness raising is updated due to introduction of professional standards and qualification evaluation centers on the market that will significantly change the paradigm of labor market functioning in the country.

The importance of vocational guidance and awareness raising is already clear to many regional authorities in Russia. For example, in the Krasnoyarsk Territory in 2013, a "Strategy for the Development of Vocational Guidance of the Population in the Krasnoyarsk Territory until 2020" was developed [15]. In this strategy, the need for such work is justified, the goals and objectives are stated, but the methodological base for vocational guidance and awareness raising, especially for young people, has not been worked out. To solve this problem, it is necessary to organize permanent work with young people, and, first of all, with schoolchildren. Explanatory work should begin at the school level, and at the initial stage it is necessary to familiarize schoolchildren with the new education system, qualification levels, professional standards, general competencies and cognitive skills required by employers. At the second level, it is necessary to talk about the professions and specialties required by the market, and about professional and special competencies and

cognitive skills. Particular emphasis should be placed on clarifying requirements for occupations in terms of professional standards, so young people should become familiar with the requirements for independent assessment. This work should have ongoing character within the framework of extra subject, for example, “Life safety”.

Educational policy should ensure accessibility and quality of education for all citizens. Education should be based on the principle of obtaining the maximum result with each student who enters this system. This policy should reproduce human capital, which will create prerequisites for economic growth. At the same time, transfers to the poor population will increase, as the economy that uses human capital will work more productively and revenues to the budget will increase. In addition, the poor will decrease, since a more productive economy will lead to the increase in the average wages.

Economic policy in conditions of innovative development of regional economy. Let's consider the most significant directions for the modern economy of innovative development. The implementation of the economic component in the socio-economic policy of the region should be based on new business models. We suggest using the following as business models for implementing the innovation strategy for the development of industries in the industrial complex.

The first model envisages achievement of the region's innovative potential on the basis of technological platforms. In this model, organization of complex scientific research, the main task is to identify problems, assess their relevance and urgency, and, most importantly, make a decision about the need for targeted financial support, which are assumed by the executive authorities of the region (in Krasnoyarsk Territory it is the regional Government). The basic organizational relations of the subjects of technological platforms allow to draw conclusion

about the high degree of regulation in the processes of scientific research and development. Among the participants of the technological platform, the Government of the Krasnoyarsk Territory and business structures are singled out using innovations obtained on the basis of the technological platform. Scientific and educational institutions that have innovative potential should act as the boosters of economic development based on technological platforms, first of all, universities that prepare engineering personnel for economy. On the Krasnoyarsk Territory, the leading role in this respect is assigned to the Flagship University (Reshetnev Siberian State University of Science and Technology).

Technological platform is a communication tool aimed at joining efforts to create promising commercial technologies, new products (services), to attract additional resources to research and development based on stakeholders involvement (business, science, education, the state, civil society) (fig. 3).

The second model provides activities based on innovative public-private partnership (PSI). On the basis of the above-mentioned proposals for boosting innovation activities in the industries, as well as analysis of industry features, we propose the concept innovative public-private partnership creation.

The specific interaction model between the participants of innovation process is that the revenues from innovative ideas and technology transfer are received by all participants of the process: authorities and scientific institutions in the form of financial revenues from the implementation of ideas and innovation process financing, as well as business structure. Solution of the problem is achieved with the help of innovative technology (development, services).

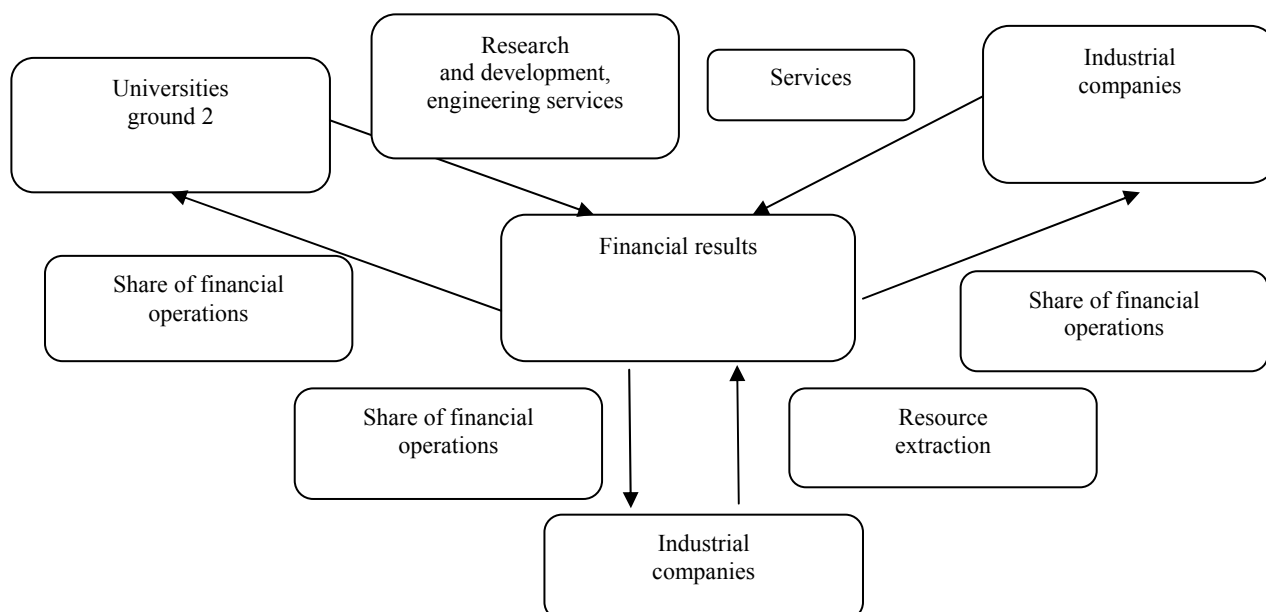


Fig. 3. Scheme of technological platform

Рис. 3. Схема технологической платформы

By technology transfer the movement of technology using any information channels from one of its individual or collective media to another is understood. It includes transfer or alienation of the exclusive right to the results of intellectual activity (as a rule, objects of industrial property) (fig. 4).

The third model functions on the basis of strategic scientific alliances. Considering the goals of creating strategic scientific alliances, we emphasize such elements of the innovation process as complex scientific research, creation of network information technologies and technologies transfer. We believe that these components of innovative activity are currently the most problematic areas and require search for new organizational forms of activity (fig. 5).

In a non-innovative economy, self-employed and small business representatives occupy those niches that they deem appropriate. This process is unregulated and

chaotic. Clear interrelations between business units are not traced. Such a model is characteristic of an economy with insufficient state regulation (fig. 6).

In an innovative economy, self-employment and small business should act as an infrastructural element of the developing economy of the innovation region [16]. In this respect, self-employment and small business is a part that accompanies the development of clusters and techno park zones. Due to territorial remoteness of innovative development zones on the Krasnoyarsk Territory, it is not always possible to provide various services to the population from the centre. What is meant here are private kindergartens, hospitals, schools, car parks and similar infrastructure, which is necessary in the regions of advanced innovative development to support the local population. Moreover, state social policy today is not able to provide innovation centers with the necessary social infrastructure (fig. 7).

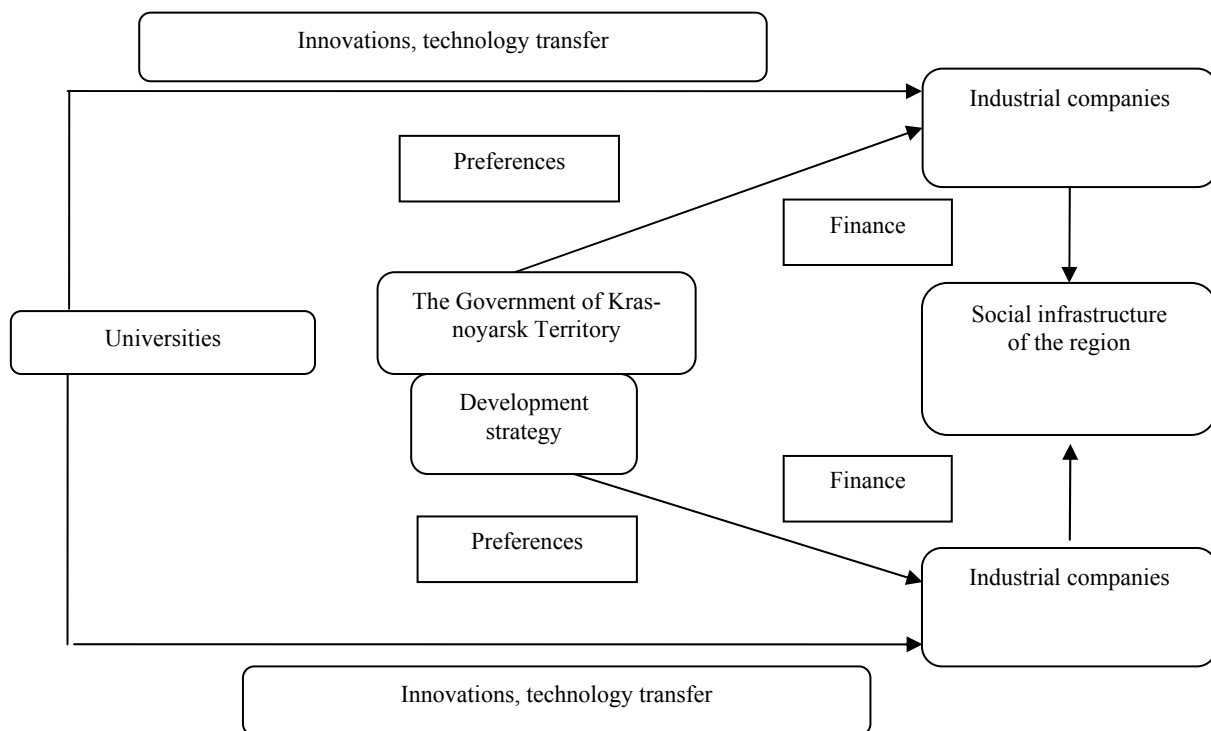


Fig. 4. Scheme of innovative public and private partnership

Рис. 4. Схема инновационного государственно-частного партнерства

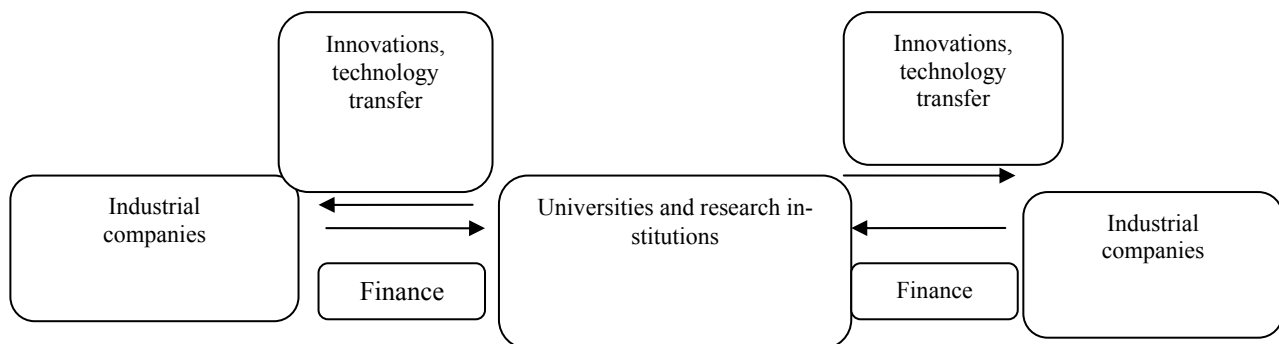


Fig. 5. Scheme of strategic scientific alliance

Рис. 5. Схема стратегического научного альянса

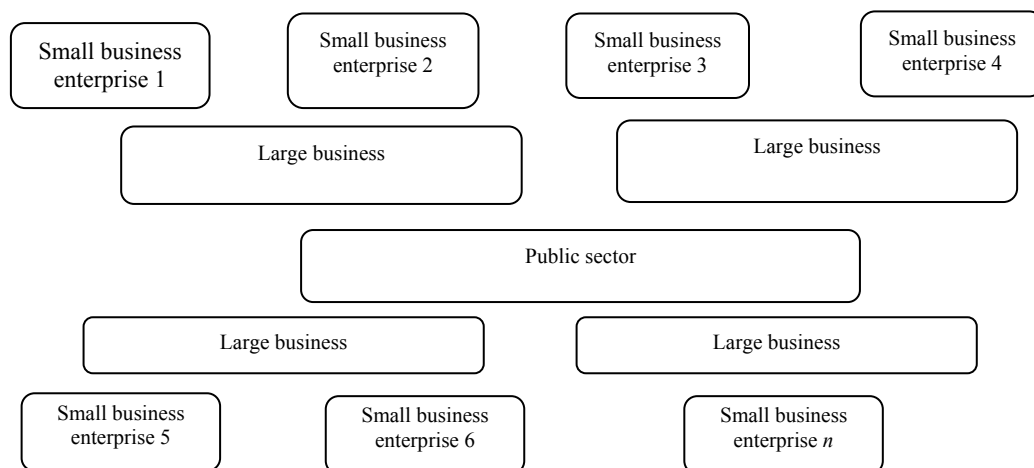


Fig. 6. The place of self-employment and small business in a regional economy of a non-innovative type

Рис. 6. Место самозанятости и малого предпринимательства в региональной экономике неинновационного типа

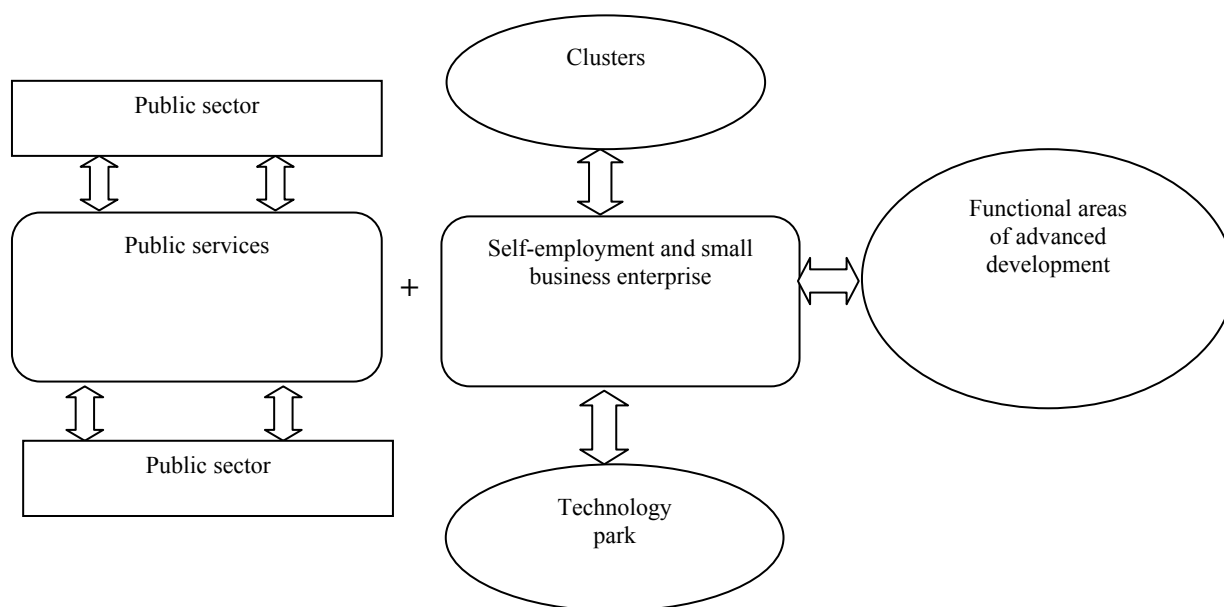


Fig. 7. The place of self-employment and small business in the regional innovation economy

Рис. 7. Место самозанятости и малого предпринимательства в региональной инновационной экономике

Conclusion. Socio-economic policy is a complex process that depends on many factors, and, mainly, on the general vector of economic development. However, in any case, socio-economic policy consists of two mutually complementary and interrelated parts: social and economic. For this reason, in this paper, the analysis of these two components was carried out separately, but within the framework of existing economic model of the economy innovative development.

1. Innovative development is the most effective type of economic development of the regional economy that meets modern requirements.

2. The Krasnoyarsk Territory is a region that belongs to the innovative type of development.

3. The socio-economic policy of the region of innovative development consists of two interrelated components: economic and social policies.

4. Economic policy is based on consolidation of business and formation of cluster systems.

5. Social policy should focus on the main goal – reproduction and growth of human capital for the innovative economy.

References

1. Zubarevich N. V., Gorina E. A. [Social Expenditures in Russia: Federal and Regional Budgets]. Moscow, NIU VShE Publ., 2015, 63 p.

2. Gaydarovskiy forum – 2017. Ekspertnaya diskussiya: novaya regional'naya politika [Expert discussion: a new regional policy] (In Russ.). Available at: <http://gaidarforum.ru/about/mediamaterials/video/12-yanvary/#lg=1&slide=>. (accessed: 22.05.2017).

3. Malakhova A. A. [Innovation policy of the Krasnoyarsk region as the source of its sustained growth]. *V sbornike: Vostochnyy vektor: sotsial'no-ekonomicheskoe razvitie Krasnoyarskogo kraia Sibirskiy federal'nyy universitet, Institut upravleniya biznes-protsessami i ekonomiki* [In the collection: East vector: social and economic development of the Krasnoyarsk Territory Siberian Federal University, Institute for Business Processes and Economics]. 2015, P. 171–176 (In Russ.).

4. Sumina E. V., Zyablikov D. V. [Innovative regional development: needs for diversified economic growth of siberia under the conditions of reindustrialization]. *Vestnik SibGAU*. 2015, Vol. 16, No. 2, P. 515–522 (In Russ.).

5. Zemtsov S., Barinova V. [The paradigm shift of the regional innovation policy in Russia: from leveling to “smart specialization”]. *Voprosy ekonomiki*. 2016, No. 10, P. 65–81 (In Russ.).

6. *Reyting innovatsionnykh regionov Rossii. AIR*. 2016. [Rating of innovative regions of Russia] (In Russ.). Available at: http://www.i-regions.org/images/files/presentations/AIRR_26.12.pdf. (accessed: 20.06.2017).

7. Bagdasaryan I. S., Boubriask I., Stupina A. A. [Cluster development]. *V sbornike: Vostochnyy vektor: sotsial'no-ekonomicheskoe razvitie Krasnoyarskogo kraia Sibirskiy federal'nyy universitet, Institut upravleniya biznes-protsessami i ekonomiki* [In the collection: East vector: social and economic development of the Krasnoyarsk Territory Siberian Federal University, Institute for Business Processes and Economics]. 2015, P. 13–16 (In Russ.).

8. *Ofitsial'nyy sayt Krasstata*. [Official site of Krasstata] Available at: krasstate.ru. (accessed: 26.06.2017). (In Russ.).

9. Sochneva E. N. *Chelovecheskiy kapital: problemy izmereniya i rosta v rossiyskoy ekonomike : monografiya* [Human Capital: Problems of Measurement and Growth in the Russian Economy: monograph]. Krasnoyarsk: SFU Publ., 2016, 188 p.

10. Sochneva E. N. [Institutional framework of social policy]. *Ekonomika i predprinimatel'stvo*. 2011, No. 2 (19), P. 40–44 (In Russ.).

11. Toffler E. *Tret'ya volna* [The Third Wave]. Moscow, ACT Publ., 2010, P. 561–562.

12. *Ofitsial'nyy sayt Agentstva truda i zanyatosti naseleniya Krasnoyarskogo kraia* [The official website of the Agency of Labor and Employment of the Krasnoyarsk Territory]. Available at: <http://www.rabota-enisey.ru/project>. (accessed: 26.06.2017).

13. Sochneva E. N. [Increase the effectiveness of the policy of combating unemployment in the Krasnoyarsk Territory]. *V sbornike: Vostochnyy vektor: sotsial'no-ekonomicheskoe razvitie Krasnoyarskogo kraia Sibirskiy federal'nyy universitet, Institut upravleniya biznes-protsessami i ekonomiki* [In the collection: East vector: social and economic development of the Krasnoyarsk Territory Siberian Federal University, Institute for Business Processes and Economics]. 2015, P. 106–109 (In Russ.).

14. Belyakova G. Ya., Bagdasaryan I. S., Vasileva Z. A., Almabekova O. A. Management strategy for regional labor market (case of the Krasnoyarsk krai). *International multidisciplinary scientific conference on social sciences & ARTS, SGEM 2016*. P. 395–399.

15. *Strategiya razvitiya professional'noy orientatsii naseleniya v Krasnoyarskom krae do 2020 goda. Agentstvo truda i zanyatosti naseleniya Krasnoyarskogo kraia*. [Strategy for the development of professional orientation of the population in the Krasnoyarsk Territory until 2020. Agency for Labor and Employment of the Krasnoyarsk Territory]. Available at: <http://rabota-enisey.ru/project/strateg>. (accessed: 26.06.2017).

16. Sumina E. V., Zyablikov D. V. [Development of an innovative business environment in the territories of the Krasnoyarsk Territory]. *Mirovaya nauka i sovremennoe obshchestvo: aktual'nye voprosy ekonomiki, sotsiologii i prava materialy V mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [World science and modern society: topical issues of economics, sociology and law, materials of the V international scientific and practical conference Development of an innovative entrepreneurial environment in the territories of the Krasnoyarsk Territory]. 2014, P. 36–40 (In Russ.).

Библиографические ссылки

1. Зубаревич Н. В., Горина Е. А. Социальные расходы в России: федеральный и региональный бюджеты. М. : НИУ ВШЭ, 2015. 63 с.

2. Гайдаровский форум – 2017. Экспертная дискуссия: новая региональная политика [Электронный ресурс]. URL: <http://gaidarforum.ru/about/mediamaterials/video/12-yanvary/#lg=1&slide=10> (дата обращения: 22.05.2017).

3. Malakhova A. A. Innovation policy of the Krasnoyarsk region as the source of its sustained growth // Восточный вектор: социально-экономическое развитие Красноярского края / Сибирский федеральный университет, Институт управления бизнес-процессами и экономики. 2015. С. 171–176.

4. Sumina E. V., Zyablikov D. V. Innovative regional development: needs for diversified economic growth of siberia under the conditions of reindustrialization // Вестник СибГАУ. 2015. Т. 16, № 2. С. 515–522.

5. Земцов С., Барина В. Смена парадигмы региональной инновационной политики в России: от выравнивания к «умной специализации» // Вопросы экономики. 2016. № 10. С. 65–81.

6. Рейтинг инновационных регионов России. АИР. 2016 [Электронный ресурс]. URL: http://www.i-regions.org/images/files/presentations/AIRR_26.12.pdf. (дата обращения: 20.06.2017).

7. Bagdasaryan I. S., Boubriask I., Stupina A. A. Cluster development // Восточный вектор: социально-экономическое развитие Красноярского края / Сибирский федеральный университет, Институт управления бизнес-процессами и экономики. 2015. С. 13–16.

8. Официальный сайт Красстата [Электронный ресурс]. URL: krasstate.ru. (дата обращения: 26.06.2017).

9. Сочнева Е. Н. Человеческий капитал: проблемы измерения и роста в российской экономике :

монография / М-во образования и науки РФ; Сиб. федер. ун-т. Красноярск, 2016. 188 с.

10. Сочнева Е. Н. Институциональные основы социальной политики // Экономика и предпринимательство. 2011. № 2 (19). С. 40–44.

11. Тоффлер Э. Третья волна [Электронный ресурс]. М. : АСТ. 2010. С. 561–562. URL: http://www.gumer.info/bibliotek_Buks/Culture/Toffler/_15.php. (дата обращения: 26.06.2017).

12. Официальный сайт Агентства труда и занятости населения Красноярского края. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rabota-enisey.ru/project>. (дата обращения: 26.06.2017).

13. Сочнева Е. Н. Повышение эффективности политики борьбы с безработицей в Красноярском крае // Восточный вектор: социально-экономическое развитие Красноярского края / Сибирский федеральный университет, Институт управления бизнес-процессами и экономики. 2015. С. 106–109.

14. Belyakova G. Ya., Bagdasaryan I. S., Vasileva Z. A., Almabekova O. A. Management strategy for regional labor market (case of the Krasnoyarsk krai) // International multidisciplinary scientific conference on social sciences & ARTS, SGEM-2016. 2016. С. 395–399.

15. Стратегия развития профессиональной ориентации населения в Красноярском крае до 2020 года [Электронный ресурс] / Агентство труда и занятости населения Красноярского края. URL: <http://rabota-enisey.ru/project/strateg/>. (дата обращения: 26.06.2017).

16. Сумина Е. В., Зябликов Д. В. Развитие инновационной предпринимательской среды на территориях Красноярского края // Мировая наука и современное общество: актуальные вопросы экономики, социологии и права : материалы V Междунар. науч.-практ. конф. 2014. С. 36–40.

© Sochneva E. N., Voronin E. A.,
Zyablikov D. V., 2017

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Аврамчикова Надежда Тимофеевна – доктор экономических наук, профессор кафедры финансов и кредита, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: avramchikova@sibsau.ru.

Агафонов Евгений Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры системного анализа и исследования операций, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: agafonov@gmx.de.

Акзигитов Артур Ревович – старший преподаватель кафедры ПНК, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: aakzigitov88@mail.ru.

Андронов Александр Сергеевич – аспирант, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kpravia@mail.ru.

Антропов Никита Романович – аспирант кафедры топливообеспечения и горюче-смазочных материалов, Институт нефти и газа, Сибирский федеральный университет. E-mail: underlag_sikrer@mail.ru.

Бежаев Юрий Алексеевич – ведущий инженер ИНК, Национальный исследовательский Томский политехнический университет. E-mail: yubezh@yandex.ru.

Бирюков Василий Иванович – профессор, доктор технических наук, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). E-mail: aviatex@mail.ru.

Борисова Елена Владимировна – аспирант кафедры финансов и кредита, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: borisovaev2015@mail.ru.

Бурков Сергей Иванович – доктор физико-математических наук, доцент, профессор, Институт инженерной физики и радиоэлектроники, Сибирский федеральный университет. E-mail: sburkov@sfu-kras.ru.

Вейсов Евгений Алексеевич – кандидат технических наук, доцент, Сибирский федеральный университет. E-mail: eveisov@sfu-kras.ru.

Верхогляд Александр Григорьевич – заведующий лабораторией, Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН. E-mail: verhog@tdisie.nsc.ru.

Воронин Евгений Александрович – заместитель проректора, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: voronin@sibsau.ru.

Высоцкий Семён Викторович – ведущий менеджер, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва.

Горев Евгений Сергеевич – начальник группы 32 отдела 3 управления войсковой части 40056. E-mail: gorev777@rambler.ru

Данильченко Юрий Витальевич – кандидат экономических наук, доцент, заведующий кафедрой менеджмента, Инженерно-экономический институт, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: danilchenko@sibsau.ru.

Данько Владислав Павлович – кандидат технических наук, доцент кафедры торговли и общественного питания, Краснодарский филиал Российского экономического университета им. Г. В. Плеханова. E-mail: vladislav.danko@mail.ru.

Дмитриев Максим Анатольевич – аспирант, Сибирский федеральный университет. E-mail: makcmad@mail.ru.

Драганюк Михаил Николаевич – студент группы МА15-01, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: midraganyuk@yandex.ru.

Дружинина Александра Алексеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации производственных процессов в металлургии, Институт цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет. E-mail: Druzhininasasha@rambler.ru.

Ерыгин Юрий Владимирович – доктор экономических наук, профессор кафедры финансов и кредита, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: yuri_erygin@mail.ru.

Ефимова Антонина Николаевна – старший преподаватель кафедры иностранных языков, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: efimova.antonina2012@yandex.ru.

Ефремова Светлана Владимировна – младший научный сотрудник ОНИРС, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: efremova_svet@sibsau.ru.

Золотова Ольга Павловна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры технической физики, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: zolotova@sibsau.ru.

Зуев Дмитрий Михайлович – студент группы МФИ15-01, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: ZuevDmitriy93@yandex.ru.

Зябликов Дмитрий Валерьевич – кандидат экономических наук, доцент кафедры теоретических основ экономики, Сибирский федеральный университет. E-mail: rewtyu@mail.ru.

Иванов Владимир Васильевич – кандидат технических наук, заместитель начальника отдела, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». E-mail: ivanov@iss-reshetnev.ru.

Исаева Ольга Сергеевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН»; Институт вычислительного моделирования СО РАН. E-mail: isaeva@icm.krasn.ru.

Карнаух Виктория Викторовна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры холодильной и торговой техники, Донецкий национальный университет экономики и торговли имени М. И. Туган-Барановского. Тел. +38-050-159-57-94.

Карцан Игорь Николаевич – кандидат технических наук, доцент, начальник Военного института, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kartsan@sibsau.ru.

Кишкан Владимир Владимирович – аспирант, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kishkan@mail.ru.

Корнеева Анна Анатольевна – старший преподаватель, кандидат технических наук, Институт космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет. E-mail: korneeva_ikit@mail.ru.

Кочура Сергей Григорьевич – кандидат технических наук, заместитель генерального конструктора, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». E-mail: kochura@iss-reshetnev.ru.

Кравчуновский Антон Павлович – студент группы А14-01, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: anton.kravchunovsky@yandex.ru.

Крат Никита Михайлович – инженер, АО «Информационные спутниковые системы имени академика М. Ф. Решетнёва»; аспирант, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. E-mail: kratnm@iss-reshetnev.ru.

Крушенко Генрих Гаврилович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт вычислительного моделирования СО РАН. E-mail: genry@icm.krasn.ru.

Кузнецов Александр Алексеевич – доктор физико-математических наук, профессор, директор Института космических исследований и высоких технологий, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kuznetsov@sibsau.ru.

Куклин Вячеслав Александрович – начальник отдела 345, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». E-mail: VAK345@iss-reshetnev.ru.

Куприн Артем Геннадьевич – инженер, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». E-mail: kprn@mail.ru.

Лаптенко Валерий Дмитриевич – доктор технических наук, профессор кафедры информационно-управляющих систем, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: ius_laptenok@sibsau.ru.

Лаптенко Павел Валерьевич – аспирант, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: laptenok@yandex.ru.

Лобанов Дмитрий Константинович – кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматического управления, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: u649@yandex.ru.

Логачева Анна Ивановна – старший эксперт, Штаб материально-технического обеспечения Вооруженных сил РФ, г. Москва. E-mail: ania.logacheva.90@mail.ru.

Макаров Сергей Николаевич – старший научный сотрудник, Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН. E-mail: makarovsn@tdisie.nsc.ru.

Максимов Игорь Александрович – кандидат технических наук, начальник отдела, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». E-mail: mia@iss-reshetnev.ru.

Медведев Александр Васильевич – доктор технических наук, профессор, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва.

Мизрах Енис Аврумович – кандидат технических наук, профессор кафедры систем автоматического управления, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: enis-home@mail.ru.

Михалкин Владимир Михайлович – заместитель директора, главный инженер отраслевого центра крупногабаритных трансформируемых механических систем, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». E-mail: mikhalkin@iss-reshetnev.ru.

Мовчан Павел Валерьевич – студент группы МИИ15-01, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: movchan.pv@gmail.com.

Морозов Егор Андреевич – лаборант, Институт биофизики СО РАН; аспирант, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: transserfer89@gmail.com.

Мурыгин Александр Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационно-управляющих систем, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: avm514@mail.ru.

Назаров Владимир Павлович – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой двигателей летательных аппаратов, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: nazarov@sibsau.ru.

Ноженкова Людмила Федоровна – доктор технических наук, профессор, заведующий отделом прикладной информатики, федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН»; Институт вычислительного моделирования СО РАН. E-mail: expert@icm.krasn.ru.

Писарев Никита Сергеевич – студент, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: nike0996@gmail.com.

Пучкин Михаил Борисович – управляющий партнёр консалтингового агентства «MBP Consulting»; старший преподаватель кафедры менеджмента, аспирант кафедры финансов и кредита, Инженерно-экономический институт, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: roochkin@yandex.ru.

Ратушняк Василий Николаевич – кандидат технических наук, доцент, Сибирский федеральный университет. E-mail: oborona-81@ya.ru.

Рыжков Дмитрий Николаевич – главный конструктор, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: dmitriynr@yandex.ru.

Савин Александр Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники; Научно-исследовательский институт радиотехнических систем. E-mail: saasavin@mail.ru.

Савостьянова Ирина Леонидовна – кандидат педагогических наук, доцент кафедры ИЭС, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: Sen@sibsau.ru.

Салтыков Михаил Юрьевич – кандидат биологических наук, младший научный сотрудник, Институт биофизики СО РАН. E-mail: saltykoff.mixail@yandex.ru.

Самотик Людмила Аркадьевна – аспирант, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: antikodona@gmail.com.

Сенашов Сергей Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой ИЭС, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: Sen@sibsau.ru.

Серяков Аркадий Владимирович – кандидат физико-математических наук, заместитель директора по науке, старший научный сотрудник, ООО «Рудетранссервис». E-mail: seryakovav@yandex.ru.

Скоробогатов Станислав Алексеевич – студент группы МФТ16-01, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: s.t.a.s.1.9.9.4@mail.ru.

Соколовский Алексей Владимирович – аспирант, Сибирский федеральный университет. E-mail: sokolovskii_a@mail.ru.

Сочнева Елена Николаевна – кандидат экономических наук, доцент кафедры теоретических основ экономики, Сибирский федеральный университет. E-mail: Sochneva.e@inbox.ru.

Стаценко Николай Иванович – студент, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: stacenkon@mail.ru.

Теряев Николай Сергеевич – аспирант кафедры технологии машиностроения, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева.

Титлов Александр Сергеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплоэнергетики и трубопроводного транспорта энергоносителей, Одесская национальная академия пищевых технологий.

Тихомиров Александр Аполлинариевич – доктор биологических наук, профессор, заведующий лабораторией управления биосинтезом фототрофов, Институт биофизики СО РАН; заведующий кафедрой замкнутых экологических систем, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: alex-tikhomirov@yandex.ru.

Трифонов Сергей Викторович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт биофизики СО РАН; старший преподаватель, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: trifonov_sergei@inbox.ru.

Трофимчук Денис Александрович – начальник группы, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: trofden@mail.ru.

Федченко Александр Сергеевич – аспирант кафедры систем автоматического управления, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: alek.fedchenko@gmail.com.

Филишина Елена Владимировна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры ИЭС, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: filyushina@sibsau.ru.

Халиманович Владимир Иванович – кандидат физико-математических наук, профессор, директор отраслевого центра крупногабаритных трансформируемых механических систем, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». E-mail: office@iss-reshetnev.ru.

Царапкин Роман Александрович – аспирант кафедры ракетных двигателей, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). E-mail: KniaZ988@mail.ru.

Чернова Светлана Сергеевна – студентка, Институт космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет. E-mail: chsvetlanas@gmail.com.

Шангина Екатерина Андреевна – кандидат технических наук, инженер-конструктор отдела общего проектирования космических аппаратов и систем, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: kati6230@yandex.ru.

Шишкина Анастасия Васильевна – студентка, Институт космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет. E-mail: shiva112@mail.ru.

Штабель Николай Владимирович – младший научный сотрудник кафедры систем автоматического управления, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: shtabnik@gmail.com.

Ярцев Евгений Николаевич – аспирант кафедры двигателей летательных аппаратов, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: yartseven.akruks@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Antropov Nikita Romanovich – postgraduate student, Department of Fuel Supply, Fuels and Lubricants, Siberian Federal University, School of Petroleum and Natural Gas Engineering. E-mail: underlag_sikrer@mail.ru.

Agafonov Evgeny Dmitrievich – Cand. Sc., Docent, Docent of Department of System Analysis and Operation Research, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: agafonov@gmx.de.

Akzigitov Artur Revovich – senior teacher, PNK department, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: aakzigitov88@mail.ru.

Andronov Alexander Sergeevich – postgraduate student, PNK department, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: kpavia@mail.ru.

Avramchikova Nadezhda Timofeevna – Dr. Sc., professor, Department of Finance and Credit, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: avramchikova@sibsau.ru.

Bezhayev Yuriy Alexeevich – leading engineer, Institute of Non-destructive Monitoring, Tomsk Polytechnic University. E-mail: yubezh@yandex.ru.

Biruykov Vasilij Ivanovich – professor, Dr. Sc., Moscow Aviation Institute (National Research University). E-mail: aviatex@mail.ru.

Borisova Elena Vladimirovna – postgraduate student. Department of Finance and Credit, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: borisovaev2015@mail.ru.

Burkov Sergey Ivanovich – Dr. Sc., Docent, professor, Institute of Engineering Physics and Radio Electronics, Siberian Federal University. E-mail: sburkov@sfu-kras.ru.

Chernova Svetlana Sergeevna – student, Institute of Space and Information Technologies, Siberian Federal University. E-mail: chsvetlanas@gmail.com.

Danilchenko Yuri Vitalievich – Cand. Sc., Docent, head of Department of Management, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: danilchenko@sibsau.ru.

Danko Vladislav Pavlovich – Cand. Sc., Docent, Department of Trade and Catering, Plekhanov Russian University of Economics. E-mail: vladislav.danko@mail.ru.

Dmitriev Maksim Anatol'evich – postgraduate student, Siberian Federal University. E-mail: makemad@mail.ru.

Draganyuk Mikhail Nikolaevich – student, group MA15-01, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: draganyuk@yandex.ru.

Druzhinina Alexandra Alekseevna – Cand. Sc., Docent, Department of Automation of production processes in metallurgy, Institute of Non-ferrous Metals and Material Science, Siberian Federal University. E-mail: Druzhininasasha@rambler.ru.

Efimova Antonina Nikolaevna – senior teacher, Foreign languages department, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: efimova.antonina2012@yandex.ru.

Efremova Svetlana Vladimirovna – junior scientific researcher, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: efremova_svet@sibsau.ru.

Erygin Yuriy Vladimirovich – Dr. Sc., professor, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: yuri_erygin@mail.ru.

Fedchenko Aleksandr Sergeevich – postgraduate student, Department of Automatic control system, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: alek.fedchenko@gmail.com.

Filyushina Elena Vladimirovna – Cand. Sc., Docent, Department of Nuclear Power Engineering, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: Filyushina@sibsau.ru.

Gorev Yvgeny Sergeevich – head of Group 32, department #3, Military Unit Office 40056. E-mail: gorev777@rambler.ru.

Isaeva Olga Sergeevna – Cand. Sc., senior researcher, Federal Research Centre “Krasnoyarsk Science Centre SB RAS”, Institute of Computational Modelling SB RAS. E-mail: isaeva@icm.krasn.ru.

Ivanov Vladimir Vasiljevich – Cand. Sc., vice head of department, JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: ivanov@iss-reshetnev.ru.

Karnaukh Viktoriia Viktorovna – Cand. Sc., Docent, Department of Refrigeration and Trade Equipment, Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky.

Kartsan Igor' Nikolaevich – Cand. Sc., Docent, Head of Military Institute, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: kartsan@sibsau.ru.

Khalimanovich Vladimir Ivanovich – Cand. Sc., professor, director of the Industrial Center of Large-Sized Foldable Mechanical Structures, JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: office@iss-reshetnev.ru.

Kishkan Vladimir Vladimirovich – postgraduate student, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: kishkan@mail.ru.

Kochura Sergey Grigorjevich – Cand. Sc., vice general designer, JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: kochura@iss-reshetnev.ru.

Korneeva Anna Anatol'yevna – senior lecturer, Cand. Sc., Institute of Space and Information Technologies, Siberian Federal University. E-mail: korneeva_ikit@mail.ru.

Krat Nikita Mikhailovich – engineer, JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”; postgraduate student, TUSUR University. E-mail: kratnm@iss-reshetnev.ru.

Kravchunovsky Anton Pavlovich – student, group A14-01, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: anton.kravchunovsky@yandex.ru.

Krushenko Genry Gavrilovich – Dr. Sc., professor, chief research officer, Institute of Computational Modelling SB RAS. E-mail: genry@icm.krasn.ru.

Kuklin Viacheslav Aleksandrovich – head of division 345, JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: VAK345@iss-reshetnev.ru.

Kuprin Artem Gennad'evich – engineer, JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: kprn@mail.ru.

Kuznetsov Alexander Alexeevich – Dr. Sc., Professor, Head of Institute of Space Research and High Technologies, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: kuznetsov@sibsau.ru.

Laptenok Pavel Valerievich – postgraduate student, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: laptenok@yandex.ru.

Laptenok Valery Dmitriyevich – Dr. Sc., professor, Department of Information control systems, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: ius_laptenok@sibsau.ru.

Lobanov Dmitriy Konstantinovich – Cand. Sc., Docent, Department of Automatic Control System, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: u649@yandex.ru.

Logacheva Anna Ivanovna – senior expert, Headquarters of the material and technical support of the armed forces of the RF, Moscow. E-mail: ania.logacheva.90@mail.ru.

Makarov Sergei Nikolaevich – senior researcher, Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS. E-mail: makarovsn@tdisie.nsc.ru.

Maximov Igor Alexandrovich – Dr. Sc., head of department, JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: mia@iss-reshetnev.ru.

Medvedev Aleksandr Vasil'evich – Dr. Sc., professor, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology.

Mikhalkin Vladimir Mikhailovich – deputy director, chief engineer of the Industrial Center of Large-Sized Foldable Mechanical Systems, JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: mikhalkin@iss-reshetnev.ru.

Mizrah Enis Avrumovich – Cand. Sc., professor, Department of Automatic Control System, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: enis-home@mail.ru.

Morozov Yegor Andreevich – laboratory technician, Institute of Biophysics SB RAS; postgraduate student, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: transserfer89@gmail.com.

Movchan Pavel Valerevich – student, group MII15-01, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: movchan.pv@gmail.com.

Murygin Alexander Vladimirovich – Dr. Sc., professor, head of Department of Information and Management Systems, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: avm514@mail.ru.

Nazarov Vladimir Pavlovich – Cand. Sc., professor, head of Department of Aircraft Engines, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: nazarov@sibsau.ru.

Nozhenkova Ludmila Fedorovna – Dr. Sc., professor, Head of Department of Applied Informatics, Federal Research Centre “Krasnoyarsk Science Centre SB RAS”, Institute of Computational Modelling SB RAS. E-mail: expert@icm.krasn.ru

Pisarev Nikita Sergeyevich – student, PNK department, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: nike0996@gmail.com.

Poochkin Mikhail Borisovich – executive partner of consulting agency “MBP Consulting”, senior lecturer, Department of Management; postgraduate student, Department of Finance and credit, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: poochkin@yandex.ru.

Ratushniak Vasilii Nikolaevich – Cand. Sc., Docent, Siberian Federal University. E-mail: oborona-81@ya.ru.

Ryzhkov Dmitriy Nikolaevich – chief designer, JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: dmitriynr@yandex.ru.

Saltukov Mihail Yurievich – Cand. Sc., junior researcher, Institute of Biophysics SB RAS. E-mail: saltykoff.mixail@yandex.ru.

Savostyanova Irina Leonidovna – Cand. Sc., Docent, Department of IES, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: Sen@sibsau.ru.

Samotik Lyudmila Arkad'evna – postgraduate student, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: antikodona@gmail.com.

Savin Alexander Alexandrovich – Cand. Sc., senior researcher, TUSUR University. E-mail: saasavin@mail.ru.

Senashov Sergey Ivanovich – Dr. Sc., professor, head of Department of Nuclear power engineering, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: Sen@sibsau.ru.

Seryakov Arkadiy Vladimirovich – Cand. Sc., deputy director on science, senior researcher, LLC “Rudetransservice”. E-mail: seryakovav@yandex.ru .

Sevostyanova Irina Leonidovna – Cand. Sc., Docent, IES department, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: Sen@sibsau.ru.

Shangina Ekaterina Andreevna – Cand. Sc., engineer-designer, Department of General design of spacecraft and systems, JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: kati6230@yandex.ru.

Shishkina Anastasiya Vasil’evna – student, Institute of Space and Information Technologies, Siberian Federal University. E-mail: shival12@mail.ru.

Shtabel Nikolay Vladimirovich – junior scientific researcher, Department of Automatic control system, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: shtabnik@gmail.com .

Skorobogatov Stanislav Alekseevich – student, group MFT16-01, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: s.t.a.s.1.9.9.4@mail.ru.

Sochneva Elena Nikolaevna – Cand. Sc., Docent, Department of Theoretical foundations of economics, Siberian Federal University. E-mail: Sochneva.e@inbox.ru.

Sokolovsky Aleksey Vladimirovich – postgraduate student, Siberian Federal University. E-mail: sokolovskii_a@mail.ru.

Statsenko Nikolay Ivanovich – student, PNK department, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: stacenkoni@mail.ru.

Teryaev Nikolay Sergeevich – postgraduate student, Department of Machine-building technology, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology.

Tikhomirov Alexander Apollinariyevich – Dr. Sc., professor, Head of laboratory of Phototrophic Biosynthesis Control, Institute of Biophysics SB RAS; Head of Department of Closed EcoSystems, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: alex-tikhomirov@yandex.ru

Titlov Alexander Sergeevich – Dr. Sc., professor, head of Department of Power Engineering and Pipeline Transport of Energy Carriers, Odessa National Academy of Food Technologies.

Trifonov Sergei Viktorovich – Cand. Sc., senior researcher, Institute of Biophysics SB RAS; senior teacher, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: trifonov_sergei@inbox.ru.

Trofimchuk Denis Alexandrovich – head of group JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: maximov@iss-reshetnev.ru.

Tsarapkin Roman Aleksandrovich – postgraduate student, Department of Rocket engines, Moscow Aviation Institute (National Research University). E-mail: KniaZ988@mail.ru.

Verkhoglyad Aleksandr Grigor’evich – head of the laboratory, Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS. E-mail: verhog@tdisie.nsc.ru.

Veysov Evgeniy Alekseevich – Cand. Sc., Docent, Siberian Federal University. E-mail: eveisov@sfu-kras.ru.

Voronin Evgeniy Aleksandrovich – Deputy Vice-Rector, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: voronin@sibsau.ru.

Vysotsky Semen Viktorovich – senior manager of JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”.

Yartsev Evgeniy Nikolaevich – postgraduate student, Department of Aircraft engines, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: yartseven.akruks@gmail.com.

Zolotova Olga Pavlovna – Cand. Sc., Docent, Department of Applied Physics, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: zolotova@sibsau.ru.

Zuev Dmitry Mikhailovich – student, group MFI15-01, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: ZuevDmitriy93@yandex.ru.

Zyablikov Dmitry Valeryevich – Cand. Sc., Docent, Department of Theoretical foundations of economics, Siberian Federal University. E-mail: rewtyu@mail.ru.