

КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ И ТЕХНОЛОГИИ

SPACECRAFTS &
TECHNOLOGIES



КА «Эталон» - 30 лет со дня запуска
Производитель: АО «ИСС»



Технологическая платформа

НИСС

Национальная Информационная
Спутниковая Система

№1 (27)
2019



НИСС

Деятельность технологической платформы «Национальная информационная спутниковая система» направлена на скоординированное решение комплекса образовательных, научных, технических, технологических и экономических проблем создания и использования перспективных космических систем и комплексов.

Стратегической целью технологической платформы «Национальная информационная спутниковая система» является разработка совокупности «прорывных» технологий для:

- радикального повышения показателей пользовательских свойств космических аппаратов новых поколений и доступности персональных пакетных космических услуг;
- значительного расширения присутствия на мировых рынках высокотехнологичной продукции и услуг в космической, телекоммуникационной и других некосмических отраслях экономики.

Журнал является официальным научным изданием технологической платформы «Национальная информационная спутниковая система».

Сайт ТП «НИСС»: tp.iss-reshetnev.ru

ISSN 2618-7957

КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ И ТЕХНОЛОГИИ

SPACECRAFTS &
TECHNOLOGIES

Том 3

№ 1 (27)
2019

Выходит один раз в три месяца

Красноярский край
Железногорск

Космические аппараты и технологии

Главный редактор
Тестоедов Николай Алексеевич
чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, профессор,
председатель редакционного совета (Железногорск)

Заместитель главного редактора
Халиманович Владимир Иванович
канд. физ.-мат. наук, профессор (Железногорск)

Ответственный секретарь
Хныкин Антон Владимирович
канд. техн. наук (Железногорск)

Редакционный совет
Аннин Борис Дмитриевич
академик РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор (Новосибирск)

Васильев Валерий Витальевич
академик РАН, д-р техн. наук, профессор (Хотьково)

Попов Гарри Алексеевич
академик РАН, д-р техн. наук, профессор (Москва)

Шабанов Василий Филиппович
академик РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор (Красноярск)

Махутов Николай Андреевич
чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, профессор (Москва)

Псахье Сергей Григорьевич
чл.-кор. РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор (Томск)

Шайдуров Владимир Викторович
чл.-кор. РАН, д-р физ.-мат. наук (Красноярск)

Беляев Борис Афанасьевич
д-р техн. наук, профессор (Красноярск)

Гарин Евгений Николаевич
д-р техн. наук, профессор (Красноярск)

Косенко Виктор Евгеньевич
д-р техн. наук, профессор (Железногорск)

Красильщиков Михаил Наумович
д-р техн. наук, профессор (Москва)

Медведский Александр Леонидович
д-р физ.-мат. наук (Жуковский)

Овчинников Сергей Геннадьевич
д-р физ.-мат. наук, профессор (Красноярск)

Панько Сергей Петрович
д-р техн. наук, профессор (Красноярск)

Пчеляков Олег Петрович
д-р физ.-мат. наук, профессор (Новосибирск)

Фатеев Юрий Леонидович
д-р техн. наук, профессор (Красноярск)

Хартон Виктор Владимирович
д-р техн. наук, профессор (Королёв)

Чеботарев Виктор Евдокимович
д-р техн. наук, профессор (Железногорск)

Чернявский Александр Григорьевич
(Королёв)

Ежеквартальный научный журнал

Издается с января 2012 года

ISSN 2618-7957

Издатель и учредитель:
Ассоциация «Технологическая платформа
«Национальная информационная спутниковая система»

Журнал «Космические аппараты и технологии» – рецензируемый научный журнал технологической платформы «Национальная информационная спутниковая система». До 2018 года издавался под названием «Исследования наукограда».

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (свидетельство ПИ № ФС77-72862 от 22.05.2018 г.)
Импакт-фактор РИНЦ за 2017 г. – 0,181.

«Космические аппараты и технологии» публикуют оригинальные работы, обзорные статьи, очерки и обсуждения, охватывающие последние достижения в области космонавтики.

Тематические направления журнала:

- ракетно-космическая техника;
- новые материалы и технологии в космической технике;
- космическое приборостроение;
- космические услуги;
- инновации космической отрасли.

К публикации принимаются статьи, ранее нигде не опубликованные и не представленные к печати в других изданиях. Статьи, отбираемые для публикации в журнале, проходят закрытое (двойное слепое) рецензирование.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Полнотекстовый доступ к электронной версии журнала возможен на сайтах www.elibrary.ru, scholar.google.com, www.cyberleninka.ru

Адрес редакции:
662972, Красноярский край,
ЗАТО г. Железногорск, ул. Ленина, 52
E-mail: isercit@gmail.com; <http://www.journal-niss.ru>

Адрес издателя:
662972, Красноярский край,
ЗАТО г. Железногорск, ул. Ленина, 52, корп. 4, ком. 224

Журнал распространяется по подписке через почтовые отделения (индекс 39491 в объединенном каталоге «Пресса России»).

Тираж 200 экз. Заказ 8209

Отпечатано Библиотечно-издательским комплексом
Сибирского федерального университета
660041, Красноярск, пр. Свободный, 82а
Тел. (391) 206-26-67; <http://bik.sfu-kras.ru>
E-mail: publishing_house@sfu-kras.ru

Spacecrafts & Technologies

Chief Editor

Testoyedov Nikolay A.

Corresponding Member of RAS, Doctor of Engineering,
Professor, Chairman of Editorial Board (Russia)

Deputy Chief Editor

Khalimanovich Vladimir I.

PhD in Physics and Mathematics, Professor (Russia)

Executive Secretary

Khnykin Anton V.

PhD in Engineering (Russia)

Editorial Board

Annin Boris D.

Academician of RAS, Doctor of Physics and Mathematics,
Professor (Russia)

Popov Garry A.

Academician of RAS, Doctor of Engineering, Professor (Russia)

Shabanov Vasily Ph.

Academician of RAS, Doctor of Physics and Mathematics,
Professor (Russia)

Vasiliev Valery V.

Academician of RAS, Doctor of Engineering, Professor (Russia)

Makhutov Nikolay A.

Corresponding Member of RAS, Doctor of Engineering, Professor (Russia)

Psakhie Sergey G.

Corresponding Member of RAS, Doctor of Physics and Mathematics,
Professor (Russia)

Shaidurov Vladimir V.

Corresponding Member of RAS, Doctor of Physics and Mathematics,
Professor (Russia)

Belyaev Boris A.

Doctor of Engineering, Professor (Russia)

Chebotaev Victor E.

Doctor of Engineering, Professor (Russia)

Fateev Yuri L.

Doctor of Engineering, Professor (Russia)

Garin Eugene N.

Doctor of Engineering, Professor (Russia)

Khartov Victor V.

Doctor of Engineering, Professor (Russia)

Kosenko Victor E.

Doctor of Engineering, Professor (Russia)

Krasilshchikov Michael N.

Doctor of Engineering, Professor (Russia)

Medvedtskiy Alexander L.

Doctor of Physics and Mathematics (Russia)

Ovchinnikov Sergey G.

Doctor of Physics and Mathematics, Professor (Russia)

Panko Sergey P.

Doctor of Engineering, Professor (Russia)

Pchelyakov Oleg P.

Doctor of Physics and Mathematics, Professor (Russia)

Cherniavsky Alexander G.

(Russia)

Scientific quarterly journal

Published since 2012

ISSN 2618-7957

Publisher and Founder:

Association «Technology Platform

«National Information Satellite System»

«Spacecrafts & Technologies» is peer-reviewed scientific journal of Technology Platform «National Information Satellite System». Until 2018 was published under the title «The Research of the Science City».

The journal is registered by the the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications (PI certificate no. FS77-72862, May 22, 2018).

The journal publishes original papers, reviews articles, rapid communications and discussions covering recent advances in space.

The journal sections:

- Rocket and space equipment;
- New materials and technologies in space equipment;
- Space instrument engineering;
- Space Services;
- Innovation of the space industry.

«Spacecrafts & Technologies» publishes only original research articles. All articles are peer reviewed by international experts. Both general and technical aspects of the submitted paper are reviewed before publication.

The publication of manuscripts is free of charge.

The journal is on open access on www.elibrary.ru, scholar.google.com, www.cyberleninka.ru

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

**И. И. Шилко, Ю. Б. Волошко,
О. В. Ружилова, О. А. Анисимова**
АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ МОДЕРНИЗАЦИИ
СТРУКТУРЫ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ
СИСТЕМЫ ГЛОНАСС ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕЁ
КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ

**В. В. Двирный, Г. Г. Крушенко, Г. В. Двирный,
А. А. Шевчук, М. В. Елфимова, М. С. Кузнецова**
ОСОБЕННОСТИ КОМПЛЕКТУЮЩИХ СИСТЕМ
ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ
АППАРАТОВ

В. А. Мызникова, В. В. Устименко, А. В. Чубарь
ПОСТРОЕНИЕ НЕЧЕТКИХ РЕГУЛЯТОРОВ
ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫХ
ОБЪЕКТОВ В СРЕДЕ SimInTech

КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

**А. А. Шевчук, Г. В. Двирный, Г. Г. Крушенко,
В. В. Двирный, М. В. Елфимова**
ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПЕРСПЕКТИВНОГО
СВЕТОДИОДНОГО ИМИТАТОРА СОЛНЕЧНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ НАЗЕМНОЙ ОТРАБОТКИ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. И. Горностаев
ПРОБЛЕМЫ УНИФИКАЦИИ
МНОГОКАНАЛЬНОГО ИНТЕРФЕЙСНОГО
МОДУЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУР ДЛЯ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ КОСМИЧЕСКИХ
АППАРАТОВ

ROCKET AND SPACE EQUIPMENT

**I. I. Shilko, Yu. B. Voloshko, O. V. Ruzhilova,
O. A. Anisimova**

ANALYSIS OF UPGRADE OPTIONS FOR THE
STRUCTURE OF ORBITAL GROUPING OF
THE GLONASS SYSTEM TO ENSURE ITS
COMPETITIVENESS

**V. V. Dvirniy, G. G. Krushenko, G. V. Dvirniy,
A. A. Shevchuk, M. V. Elfimova, M. S. Kuznetsova**
FEATURES OF COMPONENTS OF SPACECRAFT
THERMAL CONTROL SYSTEMS

V. A. Myznikova, V. V. Ustimenko, A. V. Chubar
FUZZY CONTROLLERS CONSTRUCTION IN THE
SIMINTECH ENVIRONMENT

SPACE INSTRUMENT ENGINEERING

**A. A. Shevchuk, G. V. Dvirniy, G. G. Krushenko,
V. V. Dvirniy, M. V. Elfimova**

OPTICAL SYSTEM OF PERSPECTIVE LED-BASED
SOLAR SIMULATOR FOR SPACECRAFT GROUND
TESTING APPLICATIONS

A. I. Gornostaev
PROBLEMS OF UNIFICATION OF MULTI-CHANNEL
INTERFACE TEMPERATURE CONTROL MODULE
FOR MEASURING INSTRUMENTS OF SPACECRAFT

АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ МОДЕРНИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕЁ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ

И. И. Шилко¹, Ю. Б. Волошко¹, О. В. Ружилова¹,
О. А. Анисимова^{1, 2} ✉

¹АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва»,
г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация

²Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация

Осуществлён синтез возможных вариантов модернизации орбитальной группировки глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС исходя из следующих принципов модернизации: увеличение числа космических аппаратов (КА) с сохранением трёхплоскостной структуры и изменением высоты и наклона орбит; увеличение числа КА с сохранением параметров орбит; увеличение числа КА с введением 3-х дополнительных плоскостей для размещения в них антиподных космических аппаратов (дополнительные плоскости располагаются между основными).

Проведено моделирование характеристик навигационного поля вариантов синтезированных орбитальных группировок: базовая орбитальная группировка из 24 КА с их равномерным размещением в 3-х плоскостях (ГЛОНАСС-24); из 27 КА с их равномерным размещением в 3-х плоскостях; из 30 КА с их равномерным размещением в 3-х плоскостях; из 30 КА на базе ГЛОНАСС-24, где в каждую плоскость добавлено по 2 антиподных КА; из 30 КА на базе ГЛОНАСС-24 с организацией дополнительных трёх плоскостей, в которые добавлено по 2 КА; из 30 КА, равномерно размещённых в 6-ти плоскостях; из 36 КА, равномерно размещённых в 3-х плоскостях; из 36 КА на базе ГЛОНАСС-24, в которой между штатными плоскостями добавлены 3 дополнительные плоскости, в которые добавлено по 4 КА; из 36 КА на базе ГЛОНАСС-24, где в каждую штатную плоскость добавлено по 4 КА; из 36 КА на базе ГЛОНАСС-24, в которой в каждую штатную плоскость добавлено по 2 антиподных КА и в 3-х дополнительных плоскостях добавлено по 2 антиподных КА.

На основании проведённого анализа характеристик навигационного поля отдано предпочтение варианту шестиплоскостной орбитальной группировки из 30 КА, построенной на базе ГЛОНАСС-24 с организацией дополнительных трёх плоскостей.

Ключевые слова: орбитальная группировка, космический аппарат, ГЛОНАСС, параметры орбиты, структура орбитальной группировки.

Введение

Для обеспечения конкурентоспособного уровня отечественная система ГЛОНАСС должна иметь тактико-технические характеристики (ТТХ) по точности, доступности и устойчивости радионавигационного поля, как минимум, на одном уровне с зарубежными аналогами. При этом достигнуть паритета с GPS необходимо в ближайшей перспективе на основе КА следующего поколения «ГЛОНАСС-К». Их использование определит ос-

новные характеристики отечественного координатно-временного и навигационного обеспечения до 2030 года [1–3].

Рост потребностей в навигационных услугах в мире идёт семимильными шагами, а это означает, что такими же темпами должны развиваться средства и технологии самих навигационных систем. Дальнейшее развитие системы ГЛОНАСС должно происходить с учётом двух определяющих это развитие факторов.

Первым из них является необходимость перманентного обеспечения требований существующих и перспективных потребителей различного типа. Причём не только требования к навигации потребителей в обычных условиях (на открытой

✉ anisimovaoa@iss-reshetnev.ru

© Шилко И. И., Волошко Ю. Б., Ружилова О. В.,
Анисимова О. А., 2019

местности), но и в условиях сложного рельефа местности и городской застройки в мегаполисах.

Другим фактором, который необходимо принимать во внимание при формировании направлений развития ГЛОНАСС, являются направления и уровень развития глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) за рубежом [4–8].

Основным конкурентом системы ГЛОНАСС является американская GPS, орбитальная группировка (ОГ) которой состоит из 32 КА. Интенсивно развиваются европейская ГНСС Galileo и китайская BeiDou, которые, в соответствии с планами их развития, к 2020 году будут полностью развернуты, и иметь в составе своих ОГ по 30 и 35 КА соответственно.

В связи с этим при формировании нового облика системы ГЛОНАСС необходимо учитывать, что без модернизации структуры ОГ ГЛОНАСС её характеристики будут существенно уступать аналогичным характеристикам трёх зарубежных ГНСС.

Таблица 1

Параметры орбиты ГНСС
ГЛОНАСС/GPS/Galileo/BeiDou [9, 10]

Количество штатных КА	24/32/27/27
Высота орбиты, км	19400/20200/23222/21528
Количество плоскостей	3/6/3/3
Наклонение	64,8°/54,8°/56°/57°

Синтез возможных вариантов модернизации ОГ ГЛОНАСС

Модернизация существующей ОГ ГЛОНАСС может осуществляться путём [6, 7, 11, 12]:

- увеличения числа КА с сохранением трёхплоскостной структуры и изменением высоты и наклонения орбит;
- увеличения числа КА с сохранением трёхплоскостной структуры и параметров орбит;
- увеличения числа КА с введением 3-х дополнительных плоскостей для размещения в них антиподных КА. Дополнительные плоскости располагаются между основными.

Модернизированные орбитальные группировки из 27 КА

Первое, наиболее действенное, направление связано с увеличением числа спутников в системе до 27 с возможными вариантами:

- изменения параметров ОГ (переход на более высокие орбиты с большой полуосью,

$a = 27594$ км, повторяемостью трассы – 17/9, периодом 12 ч 40 мин и понижением наклонения до 57°);

- сохранения параметров существующей ОГ (небольшое поднятие высоты орбит для сохранения изотрассности).

В первом варианте характеристики навигационных услуг будут практически совпадать с характеристиками Galileo (имеет место слабая широтная асимметрия за счёт отличий наклонений, но несколько лучшее, чем в Galileo, качество навигации в приполярных регионах).

Во втором варианте формируется ОГ из 27 КА по 9 КА в каждой плоскости с высотой на 100 км выше штатной ($T = 40811$ с, $a = 25620$ км, повторяемость трассы – 19/9).

В табл. 2 приводятся навигационные характеристики для этих 2-х вариантов: ОГ ГЛОНАСС из 27 КА с параметрами орбит, близкими к номинальным, ОГ ГЛОНАСС-27* модернизированная ($a = 27730$ км, $i = 57^\circ$); и ОГ Galileo ($a = 29600$ км, $i = 57^\circ$), также состоящая из 27 КА.

Наиболее приемлемый вариант модернизации ОГ системы ГЛОНАСС (ОГ из 27 КА с сохранением её наклонения, но изменением высоты на ~100 км) для своей реализации потребует:

- перестройки орбитальной группировки (перевод функционирующих КА в новые системные точки) и вывод её из целевого использования на длительное время (0,5 года);
- изменения программно-методической документации по управлению КА из-за изменения изотрассности (вместо 8 суток будет 9 суток).

Для обеспечения работы в системе ГЛОНАСС с ОГ из 27 КА как существующего, так и создаваемого парка потребителей также необходимо разработать новый суперкадр для передаваемой с КА ГЛОНАСС навигационной информации по дополнительным 3 КА, провести доработку бортовой навигационной аппаратуры КА, средств НКУ ГЛОНАСС, согласовать радиочастотную заявку на дополнительные литеры частот.

Модернизированные орбитальные группировки из 30 КА

Изотрассные варианты ОГ, состоящие из 30 КА, требуют повышения высоты орбиты ОГ ГЛОНАСС на 200 км. Такая ОГ имеет большую полуось a , равную 25710 км, повторяемость трассы – 21/10, драконический период – 41026 с. Такая ОГ является трёхплоскостной, в каждой плоскости находится по 10 равномерно распределённых КА, наклонение их орбит $64,8^\circ$. Навигационные характеристики этой ОГ практически совпадают с характеристиками ОГ-30 (неизотрассная), и несколько лучше, чем у Galileo из 27 КА. В табл. 3 приведены навигационные характеристики этих 3-х ОГ.

Таблица 2

Навигационные характеристики 2-х вариантов ОГ ГЛОНАСС-27 и ОГ Galileo-27

	ОГ ГЛОНАСС-27 Г/Р	ОГ ГЛОНАСС-27* Г/Р	ОГ Galileo-27 Г/Р
Среднее значение пространственного геометрического фактора PDOP для угла места 5°	1,78/1,62	1,74/1,67	1,71/1,68
Доступность по условию $PDOP \leq 6$ на открытой местности с ограничениями по углу места 5°	1/1	1/1	1/1
Доступность повышенной точности по условию $PDOP \leq 2$ на открытой местности с ограничениями по углу места 5°	0,801/0,894	0,842/0,880	0,872/0,883
Доступность по условию $PDOP \leq 6$ в городской и горной местности с ограничениями по углу места 25°	0,725/0,877	0,804/0,815	0,852/0,807

Примечание: Г – глобальная зона обслуживания, Р – зона обслуживания территории Российской Федерации.

Таблица 3

Навигационные характеристики ОГ ГЛОНАСС из 30 КА и ОГ Galileo

	ОГ-30 $a = 25509$ км Г/Р	ОГ-30 $a = 25710$ км Г/Р	ОГ Galileo-27 Г/Р
Среднее значение пространственного геометрического фактора PDOP для угла места 5°	1,66/1,51	1,66/1,51	1,71/1,68
Доступность по условию $PDOP \leq 6$ на открытой местности с ограничениями по углу места 5° (%)	1/1	1/1	1/1
Доступность повышенной точности по условию $PDOP \leq 2$ на открытой местности с ограничениями по углу места 5° (%)	0,912/0,991	0,916/0,992	0,872/0,883
Доступность по условию $PDOP \leq 6$ в городской и горной местности с ограничениями по углу места 25° (%)	0,876/0,970	0,880/0,972	0,852/0,807

Рассмотренные в данном разделе ОГ из 30 КА дают существенный эффект в улучшении навигационных характеристик. При их формировании практически не должны возникать проблемы с запасами топлива на модернизацию.

Однако эти варианты создают определённые риски при формировании ОГ (несрабатывание одной из двигательных установок не позволит добиться нужного результата) и, кроме того, переходный процесс для них длительный по времени и ухудшает характеристики радионавигационных полей (РНП).

Модернизация структуры ОГ на основе добавления КА в существующие плоскости ОГ ГЛОНАСС без модификации существующих слотов штатной ОГ

Ещё одно направление модификации ОГ ГНСС ГЛОНАСС это добавление КА в существующие три плоскости ОГ ГЛОНАСС без модификации слотов штатной ОГ. Ниже приводится орбитальная группировка системы ГЛОНАСС, состоящая из 30 аппаратов: 24-х штатных и 6 дополнительных.

Основной вариант (ОГ-30Б) – в штатную группировку ГЛОНАСС-24 добавляются 6 спут-

ников: по 2 в каждую плоскость, расположение спутников антиподное. Значения аргументов широт для этого варианта приведены в табл. 4.

Таблица 4

Аргументы широты спутников группировки ГЛОНАСС ОГ-30Б

Номер спутника в плоскости	Плоскость 1	Плоскость 2	Плоскость 3
1	0	15	30
2	-22,5	-30	-15
3	-45	-52,5	-60
4	-90	-75	-82,5
5	-135	-120	-105
6	-180	-165	-150
7	-202,5	-210	-195
8	-225	-232,5	-240
9	-270	-255	-262,5
10	-315	-300	-285

Примечание: жирным шрифтом выделены те спутники, которые добавлены в номинальную 24-х спутниковую группировку ГЛОНАСС.

Модернизация ОГ ГЛОНАСС на основе введения дополнительных плоскостей

Группировка ГЛОНАСС использует 6 плоскостей: в штатную группировку добавляются 3 дополнительные плоскости, в каждой из которых находятся по 2 антиподных спутника. Дополнительные плоскости расположены между основными (ОГ-30А). Такой вариант можно использовать как промежуточный для дальнейшей трансформации орбитальной группировки ГЛОНАСС: 18 спутников в основных 3-х плоскостях и 12 в дополнительных плоскостях. Значения аргументов широты и долготы восходящих узлов для ОГ-30А приведены в табл. 5.

Все остальные параметры: наклонение орбиты, долгота восходящего узла, высота орбиты, эксцентриситет (орбиты круговые) – соответствуют номинальным параметрам системы ГЛОНАСС. Отметим, что ОГ-30А из табл. 5 является однострассовой.

Далее в табл. 6 приводятся навигационные характеристики всех приведённых выше вариантов модернизации ОГ из 30 КА.

Анализ рассмотренных вариантов показывает, что вариант модернизации ОГ системы ГЛОНАСС с использованием равномерного расположения спутников в пространстве ОГ-30 обладает наилучшими характеристиками для обеспечения глобальной навигации. Однако он требует перемещения спутников в новые орбитальные позиции, что непрямолинейно.

Таблица 5

Аргументы широты спутников группировки ГЛОНАСС ОГ-30А

Номер спутника в плоскости	$\Omega = 0^\circ$	$\Omega = 60^\circ$	$\Omega = 120^\circ$	$\Omega = 180^\circ$	$\Omega = 240^\circ$	$\Omega = 300^\circ$
1	0		15		30	
2	-45	-37,5	-30		-15	
3	-90		-75	-67,5	-60	
4	-135		-120		-105	-52,5
5	-180		-165		-150	
6	-225	-217,6	-210		-195	
7	-270		-255	-247,5	-240	
8	-315		-300		-285	-232,5

Таблица 6

Навигационные характеристики ОГ из 30 КА

	ГЛОНАСС-24 Г/Р	ОГ-30 Г/Р	ОГ-30А Г/Р	ОГ-30Б Г/Р	ОГ-30 (6×5) Г/Р
Среднее значение пространственного геометрического фактора PDOP для угла места 5°	1,94/1,74	1,66/1,51	1,67/1,54	1,72/1,56	1,61/1,55
Доступность по условию $PDOP \leq 6$ на открытой местности с ограничениями по углу места 5°	0,99991/1	1/1	1/1	1/1	1/1
Доступность повышенной точности по условию $PDOP \leq 2$ на открытой местности с ограничениями по углу места 5°	0,614/0,842	0,912/0,991	0,87/0,965	0,836/0,983	0,936/0,973
Доступность по условию $PDOP \leq 6$ в городской и горной местности с ограничениями по углу места 25°	0,492/0,786	0,876/0,97	0,710/0,89	0,730/0,93	0,772/0,964

Варианты дальнейшего развития ОГ ГЛОНАСС до 36 КА

Дальнейшее развитие ОГ с учётом доведения числа КА в ОГ до 36 позволяет рассмотреть, по аналогии с ОГ из 30 КА, следующие варианты построения:

- ОГ-36: ОГ из 36 КА, равномерно распределённых по 3-м плоскостям;
- ОГ-36А: ОГ из 36 КА, распределённых в 6 плоскостях – 3 плоскости по 8 КА плюс 3 пло-

скости по 4 КА (ОГ-30А плюс 2 антиподных дополнительных КА в каждой плоскости);

- ОГ-36Б: ОГ из 36 КА в трёх плоскостях – ОГ-30Б, дополненная 6 КА по 2 дополнительных антиподных КА в каждой плоскости ОГ-30Б;

- ОГ-36С: ОГ из 36 КА в шести плоскостях – ОГ на базе ОГ ГЛОНАСС-24, в которой в каждую штатную плоскость добавлено по 2 антиподных КА, и в 3-х дополнительных плоскостях добавлено по 2 антиподных КА (такая ОГ является совмещённым вариантом ОГ-30А и ОГ-30В).

Таблица 7

Навигационные характеристики ОГ-36, ОГ-36А, ОГ-36Б, ОГ-36С

	ОГ-36 Г/Р	ОГ-36А Г/Р	ОГ-36Б Г/Р	ОГ-36С Г/Р
Среднее значение пространственного геометрического фактора PDOP для угла места 5°	1,49/1,35	1,47/1,38	1,54/1,41	1,52/1,46
Доступность по условию $PDOP \leq 6$ на открытой местности с ограничениями по углу места 5° (%)	1/1	1/1	1/1	1/1
Доступность повышенной точности по условию $PDOP \leq 2$ на открытой местности с ограничениями по углу места 5° (%)	0,960/1	0,971/1	0,953/0,99995	0,951/0,990
Доступность по условию $PDOP \leq 6$ в городской и горной местности с ограничениями по углу места 25° (%)	0,956/1	0,846/0,938	0,900/0,985	0,831/0,923

Как и в случае ОГ из 30 КА при доведении численности КА до 36 наилучшим вариантом из этого класса ОГ является равномерная ОГ-36.

Анализ вариантов модернизации структуры орбитальной группировки системы ГЛОНАСС для обеспечения её конкурентоспособности

Целью модернизации ОГ ГЛОНАСС является доведение её характеристик до конкурентоспособного уровня.

Приведённая классификация вариантов модернизации ОГ и рассмотрение их характеристик, достоинств, недостатков и методов создания показало следующее:

1. Для доведения ТТХ ГЛОНАСС по точности и доступности до конкурентоспособного уровня, в том числе для компенсации зон ухудшения точности, существуют различные классы орбит и методы их построения, к основным из которых относятся:

- реконфигурация (реконструкция) штатной ОГ, заключающаяся в более или менее существен-

ном изменении параметров существующей ОГ ГЛОНАСС;

- добавление к штатной ОГ дополнительных орбитальных сегментов, сохраняя при этом штатную ОГ ГЛОНАСС;

- создание новой ОГ параллельно с существующей ОГ на новых плоскостях с постепенным включением запускаемых КА в целевое использование.

2. При выборе класса орбит и методов их построения необходимо учесть существующие ограничения на модернизацию ОГ ГЛОНАСС, к которым относятся: ограничения на число лите-ров, имеющиеся затраты топлива КА, требования к процессу модернизации по времени и ТТХ РНП при его проведении, возможность обеспечения построения и функционирования новой ОГ за счёт утверждённой программы запусков, используемых средств выведения, наземного комплекса управления. Необходимо отметить, что при любой модернизации ОГ необходима модернизация и развитие навигационных кадров.

3. Классы ОГ, получаемые на основе повышения высоты орбит КА, включая функционирую-

щие КА, не целесообразны. Это связано с тем, что они требуют изменения параметров орбит с помощью изменения программы запусков и реконфигурации существующей ОГ, что требует больших затрат топлива и времени на реконфигурацию. Единственным приемлемым вариантом увеличения высоты КА является создание параллельно с существующей ОГ ГЛОНАСС в других плоскостях изотрассной ОГ из 30 КА с высотой, большей номинала на 200 км. Достоинством такого варианта является отсутствие необходимости коррекции орбит существующих КА, возможность практического сохранения схем выведения и достоинства самой ОГ (равномерность, изотраснность).

4. Изменение наклона с целью компенсации зон ухудшения точности тоже не целесообразно, так как требует неприемлемых затрат на коррекцию и существенного изменения программы выведения при отсутствии соответствующего эффекта.

Кроме развития ОГ ГЛОНАСС в рамках средневысотных орбит целесообразно рассматривать развитие ОГ за счёт создания регионального сегмента на основе геосинхронных орбит, в том числе геостационарных орбит, геосинхронных наклонных орбит и высокоэллиптических орбит. Достоинством этих орбит являются улучшение навигационных характеристик, в основном на территории РФ, а также возможность осуществлять комплексирование навигационных и связных услуг. В то же время использование дополнения из геосинхронных ОГ потребует серьёзной модерниза-

ции наземного комплекса управления, программы запусков и, скорее всего, создания КА нового типа.

Заключение

На основе проведённого предварительного анализа можно сделать вывод о том, что предпочтительным является вариант перехода к шестиплоскостной ОГ из 30 КА (в штатную группировку добавляются 3 дополнительные плоскости), который обеспечит следующие возможности:

- повышение устойчивости навигации при использовании существующей навигационной аппаратуры потребителей (НАП), функционирующей по 24-м КА ГЛОНАСС, на основе стратегии переключения режимов функционирования части дополнительных КА в случае выхода из строя до 6-ти из 24 КА штатной ОГ;

- существенное повышение качества навигации для перспективной НАП, функционирующей по расширенной ОГ из 30 КА;

- изотраснность орбит и, как следствие, более высокую по сравнению с неизотраснными вариантами устойчивость орбитальных параметров и параметров РНП на протяжении всего срока активного существования без использования корректирующих импульсов;

- преемственность с существующей ОГ и открытость ОГ данного типа к дальнейшему (более 30 КА) эффективному развитию ОГ, пределом которого является достижение состава из 48 КА в виде удвоенной существующей ОГ ГЛОНАСС.

Список литературы

- [1] Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения : учеб. пособие ; Сиб. гос. аэрокосм. ун-т. Красноярск, 2011. 488 с.
- [2] Харисов В. Н. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. В. Н. Харисова [и др.]. М. : Радиотехника, 2010. 800 с.
- [3] Сетевые спутниковые радионавигационные системы / В. С. Шебшаевич, П. П. Дмитриев, Н. В. Иванцев [и др.] ; под ред. В. С. Шебшаевича. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Радио и связь, 1993. 408 с.
- [4] Косенко В. Е., Звонарь В. Д., Кульков А. Н., Чеботарев В. Е., Фаткулин Р. Ф., Ружилов О. В. Программа поддержания штатной орбитальной группировки системы ГЛОНАСС на период до 2020 года // Системный анализ, управление и навигация : материалы 18-й Междунар. конф. Евпатория. 2013.
- [5] Звонарь В. Д., Чеботарев В. Е., Фаткулин Р. Ф., Гречкосеев А. К., Тентилов Ю. А., Волошко Ю. Б. Моделирование параметрических характеристик навигационного КА на теневых орбитах // Системный анализ, управление и навигация : материалы 18-й Междунар. конф. Евпатория. 2013.
- [6] Ступак Г. Г., Ревнивых С. Г., Игнатович Е. И., Куршин В. В., Бетанов В. В., Панов С. С., Бондарев Н. З., Чеботарев В. Е., Балашова Н. Н., Сердюков А. И., Синцова Л. Н. Исследование вариантов совершенствования структуры орбитальной группировки ГНСС ГЛОНАСС до 2020 года и далее с учетом доведения ее состава к 2020 году до 30 КА // Вестник СибГАУ. 2013. № 6. С. 23–31.
- [7] Тестоедов Н. А., Косенко В. Е., Сторожев С. В., Звонарь В. Д., Ермоленко В. И., Чеботарев В. Е. История создания и перспективы развития космической навигации в России // Вестник СибГАУ. 2013. № 6 (52). С. 7–17.
- [8] Тестоедов Н. А., Косенко В. Е., Звонарь В. Д., Фаткулин Р. Ф., Чеботарев В. Е. Концепция программы развития космического комплекса системы ГЛОНАСС // Системный анализ, управление и навигация : материалы 19-й Междунар. конф. Анапа. 2014.

- [9] Прикладной потребительский центр и система информационного обеспечения. ГНСС GALILEO [Электронный ресурс]. URL: <http://ppcmnic.ru/gnss/galileo> (дата обращения: 05.04.2019)
- [10] Прикладной потребительский центр и система информационного обеспечения. ГНСС BEIDOU [Электронный ресурс]. URL: <http://ppcmnic.ru/gnss/beidou> (дата обращения: 05.04.2019)
- [11] Косенко В. Е., Сторожев С. В., Звонарь В. Д., Фаткулин Р. Ф., Чеботарев В. Е. Направления модернизации космического комплекса системы ГЛОНАСС // Системный анализ, управление и навигация : материалы 20-й Междунар. конф. Евпатория. 2015.
- [12] Косенко В. Е., Звонарь В. Д., Волошко Ю. Б., Чеботарев В. Е. Архитектура высокоорбитального дополнения к системе ГЛОНАСС // Системный анализ, управление и навигация : материалы 22-й Междунар. конф. Евпатория. 2017. С. 9–10.

ANALYSIS OF UPGRADE OPTIONS FOR THE STRUCTURE OF ORBITAL GROUPING OF THE GLONASS SYSTEM TO ENSURE ITS COMPETITIVENESS

I. I. Shilko¹, Yu. B. Voloshko¹, O. V. Ruzhilova¹, O. A. Anisimova^{1, 2}

¹JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation

²Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

A synthesis of possible options for upgrading the orbital grouping of the global navigation satellite system GLONASS was carried out based on the following modernization principles: an increase the number of spacecrafts, while maintaining the three-plane structure and changing the height and inclination of the orbits; increase the number of spacecrafts, while maintaining the parameters of the orbits; increasing the number of spacecrafts with the introduction of 3 additional planes to accommodate antipodal spacecraft in them (additional planes are located between the main ones).

The characteristics of the navigation field of the variants of the synthesized orbital groupings were modeled: the basic orbital group of 24 spacecrafts with their uniform placement in 3 planes (GLONASS-24); from 27 spacecrafts with their uniform placement in 3 planes; from 30 spacecrafts with their uniform placement in 3 planes; from 30 spacecrafts based on GLONASS-24, where 2 antipodal spacecrafts are added to each plane; from 30 spacecrafts on the basis of GLONASS-24 with the organization of additional three planes, in which 2 spacecrafts are added each; from 30 spacecrafts uniformly placed in 6 planes; from 36 spacecrafts uniformly placed in 3 planes; from 36 spacecrafts based on GLONASS-24, in which 3 additional planes are added between the standard planes, in which 4 spacecrafts are added each; from 36 spacecrafts on the basis of GLONASS-24, where 4 spacecrafts are added to each regular plane; from 36 spacecrafts based on GLONASS-24, in which 2 antipodal spacecrafts were added to each regular plane, and 2 antipodal spacecrafts were added to 3 additional planes.

Based on the analysis of the characteristics of the navigation field, preference was given to the six-plane orbital group of 30 spacecrafts, built on the basis of GLONASS-24 with the organization of three additional planes.

Keywords: orbital grouping, spacecraft, GLONASS, orbit parameters, orbital grouping structure.

References

- [1] Chebotarev V. E., Kosenko V. E. *Osnovy proektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya* [Fundamentals of spacecraft design information support]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2011. 488 p. (In Russian)
- [2] Kharisov V. N., Perov A. I., Boldin V. A. GLONASS. *Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya* [GLONASS. Construction principles and operation]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2010. 800 p. (In Russian)
- [3] Shebshaevich V. S., Dmitriev P. P., Ivantsevich N. V., Kalugin A. V., Kovalevsky E. G., Kudryavtsev I. V., Kutikov V. Yu., Molchanov Yu. B., Maksyutenko Yu. A. *Setevye sputnikovyie radionavigatsionnye sistemy* [Network satellite radio navigation systems]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1993, 408 p. (In Russian)
- [4] Kosenko V. E., Zvonar V. D., Kulikov A. N., Chebotarev V. E., Fatkulov R. F., Ruzhilova O. V. *Programma podderzhaniya shtatnoj orbital'noj gruppировки sistemy GLONASS na period do 2020 goda* [The program for maintaining the standard orbital grouping of the GLONASS system for the period up to 2020] // *Sistemnyj analiz, upravlenie i navigatsiya : materialy 18-j Mezhdunar. konf.* [System analysis, management and navigation: materials of the 18th International conference]. Evpatoria, 2013. (In Russian)

- [5] Zvonar V. D., Chebotaryov V. E., Fatkulin R. F., Grechkoseyev A. K., Tentilov Yu. A., Voloshko Yu. B. *Modelirovanie parametricheskikh harakteristik navigacionnogo KA na tenevyh orbitah* [Simulation of parametric characteristics of navigation spacecraft in shadow orbits] // *Sistemnyj analiz, upravlenie i navigaciya : materialy 18-j Mezhdunar. konf.* [System analysis, management and navigation: materials of the 18th International conference]. Evpatoria, 2013. (In Russian)
- [6] Stupak G. G., Revnivykh S. G., Ignatovich E. I., Kurshin V. V., Betanov V. V., Panov S. S., Bondarev N. Z., Chebotarev V. E., Balashova N. N., Serdyukov A. I., Sintsov L. N. *Issledovanie variantov sovershenstvovaniya struktury orbital'noj gruppировки GNSS GLONASS do 2020 goda i dalee s uchetom dovedeniya ee sostava k 2020 godu do 30 KA* [Investigation of options for improving the structure of the orbital group of GNSS GLONASS until 2020 and further, taking into account bringing its composition up to 30 satellites by 2020] // *Vestnik SibGAU*, 2013, no. 6, pp. 23–31. (In Russian)
- [7] Testodov N. A., Kosenko V. E., Storozhev S. V., Zvonar V. D., Ermolenko V. I., Chebotarev V. E. *Istoriya sozdaniya i perspektivy razvitiya kosmicheskoy navigacii v Rossii* [The History of Creation and Prospects for the Development of Space Navigation in Russia] // *Vestnik SibGAU*, 2013, no. 6 (52), pp. 7–17. (In Russian)
- [8] Testodov N. A., Kosenko V. E., Zvonar V. D., Fatkulin R. F., Chebotarev V. E. *Koncepciya programmy razvitiya kosmicheskogo kompleksa sistemy GLONASS* [The concept of the program for the development of the GLONASS space complex] // *Sistemnyj analiz, upravlenie i navigaciya : materialy 19-j Mezhdunar. konf.* [System analysis, management and navigation: materials of the 19th International conference]. Anapa, 2014. (In Russian)
- [9] Applied consumer center and information support system. GNSS GALILEO. Available at: <http://ppcmnic.ru/gnss/galileo> (accessed: 05.04.2019).
- [10] Applied consumer center and information support system. GNSS BEIDOU. Available at: <http://ppcmnic.ru/gnss/beidou> (accessed: 05.04.2019).
- [11] Kosenko V. E., Storozhev S. V., Zvonar V. D., Fatkulin R. F., Chebotarev V. E. *Napravleniya modernizacii kosmicheskogo kompleksa sistemy GLONASS* [Directions of Modernization of the GLONASS Space Complex] // *Sistemnyj analiz, upravlenie i navigaciya : materialy 20-j Mezhdunar. konf.* [System analysis, management and navigation: materials of the 20th International conference]. Evpatoria, 2015. (In Russian)
- [12] Kosenko V. E., Zvonar V. D., Voloshko Yu. B., Chebotarev V. E. *Arhitektura vysokoorbital'nogo dopolneniya k sisteme GLONASS* [Architecture of the High-Orbit Addition to the GLONASS System] // *Sistemnyj analiz, upravlenie i navigaciya : materialy 22-j Mezhdunar. konf.* [System analysis, management and navigation: materials of the 22nd International conference]. Evpatoria, 2017, pp. 9–10. (In Russian)

ОСОБЕННОСТИ КОМПЛЕКТУЮЩИХ СИСТЕМ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В. В. Двирный^{1,2}, Г. Г. Крушенко³, Г. В. Двирный⁴,

А. А. Шевчук^{1,2} ✉, М. В. Елфимова⁵, М. С. Кузнецова²

¹АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва,
г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация

²Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация

³Институт вычислительного моделирования СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН,
г. Красноярск, Российская Федерация

⁴Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М. Ф. Решетнёва,
г. Красноярск, Российская Федерация

⁵Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация

Основными показателями качества космических аппаратов являются их надёжность и срок активного существования на орбите, и существенную роль в этом играет их температурный режим. Одна из основных задач системы терморегулирования заключается в обеспечении заданного теплового режима, при котором обеспечивается стабильная работа всех систем внутри объёма космического аппарата. Это требует применения специальных агрегатов – насосов, подающих по заданному контуру теплоноситель, вентиляторов и других, регулирующих сбор, передачу и перераспределение тепла. Как к системе терморегулирования в целом, так и ко всем составляющим её агрегатам, предъявляются высокие требования, в том числе по массогабаритным характеристикам, гарантированному сроку службы, ресурсу и надёжности. Предложен параметр совершенства комплектующих системы терморегулирования. Показаны основные этапы проектирования, разработки и экспериментальной отработки агрегатов космических аппаратов. Подробно рассмотрены принципы работы и состав систем терморегулирования, основные параметры и устройство составляющих их агрегатов – различных типов нагнетателей жидкости и малорасходных вентиляторов газа малой мощности, обеспечивающих заданные малые величины расходов и напоров с высокой надёжностью в пределах установленного срока непрерывной работы, в том числе с применением резервирования. В результате совершенствования системы терморегулирования, наряду с совершенствованием других систем жизнеобеспечения, срок активного существования спутников к настоящему времени достигает 15 лет.

Ключевые слова: система терморегулирования, комплектующие агрегаты, малорасходные вентиляторы, резервирование, геометрические характеристики лопастей.

Введение

Создание в СССР и России информационных космических систем и комплексов прикладного назначения послужило обеспечению миллионов наземных потребителей всеми видами связи и иных информационных услуг, удовлетворению потребностей страны в областях как её обороноспособности, так и комплексного социально-эко-

номического развития, а также международного сотрудничества в рамках развития мирового информационного сообщества [1].

В настоящее время наиболее динамично развивающимися направлениями мирового космического рынка считаются телекоммуникация, навигация, а также мониторинг и дистанционное зондирование Земли. Данные космического мониторинга используются в сельском хозяйстве и во многих областях экономической деятельности, для решения самых разнообразных производственных задач и для научных исследований. Одним из приоритетных направлений космического мониторинга в России является ликвидация

✉ expert-zh24@yandex.ru

© Двирный В. В., Крушенко Г. Г., Двирный Г. В.,
Шевчук А. А., Елфимова М. В.,
Кузнецова М. С., 2019

последствий чрезвычайных ситуаций. Сейчас космическая группировка МЧС России насчитывает двенадцать спутников, в том числе восемь – отечественного производства, обработка информации которых происходит в пяти наземных комплексах.

С развитием космических систем и космических комплексов телекоммуникационного и координатометрического назначения возрастают требования и к комплектующим всех систем космических аппаратов (КА). Срок активного существования (САС) современных КА достигает 15 лет, а, например, изготовленного в АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва» телекоммуникационного спутника «SESAT», где при гарантированном 10-летнем САС для быстровращающихся центробежных насосов и вентиляторов необходимо было доказать возможность двукратного ресурса [2], фактически достиг 18 лет.

В зависимости от орбиты КА предъявляются требования к системе терморегулирования (СТР) и, соответственно, к ее комплектующим – таким агрегатам, как вентиляторы, электронасосные агрегаты (ЭНА), клапаны-регуляторы, терморегуляторы, клапаны перепускные, теплообменники, тепловые трубы (ТТ), клапаны обратные, муфты гидравлические, клапаны заправочные, вентили заправочные [3; 4]. Например, высокий ресурс вентилятора КА «SESAT» достигнут за счёт подпитки смазки в подшипники.

Надёжное функционирование высокоресурсных машин, особенно сложных информационных систем в авиации, электропромышленности, космической и вычислительной технике и т.д., определяется бесперебойной работой входящих в конструкцию агрегатов. Агрегаты, работающие с газовыми и жидкостными рабочими средами, представляют собой механические, пневматические, гидравлические, электромеханические и электромагнитные устройства, иногда объединяемые общим названием «устройства исполнительно-автоматики», которые обеспечивают работу систем охлаждения, термостатирования, ориента-

ции, наведения, питания и т. п. Вопросы их проектирования, конструирования, особенности экспериментальной отработки, обеспечение надёжности, актуальны и в настоящее время.

Очень важны рекомендации по обеспечению длительного, до 15 лет, ресурса с перспективой дальнейшего увеличения. Решение проблемы длительного ресурса работы в автономных условиях с учётом высоких требований к надёжности агрегатов возможно при комплексном сочетании методов теории механизмов и машин, метрологии и теории вероятностей, поэтому крайне важно учитывать особенности создания агрегатов, работающих в экстремальных условиях по температурным перепадам, динамическим нагрузкам, давлению и времени воздействия. Также важно, чтобы конструкции агрегатов были рациональны по массогабаритным характеристикам.

На первом простейшем спутнике Земли в СТР применялись такие комплектующие, как вентилятор, заправочный клапан, а также заправочный вентиль, который использовался для заправки системы азотом на Земле. Однако, например, из-за неблагоприятного стечения допусков в вентиле для отжатия заправочного клапана на полигоне однажды возникла необходимость при подготовке к запуску КА «Молния» применить на штоке втулку-удлинитель. В дальнейшем конструкция вентилей была усовершенствована.

Для оценки совершенства комплектующих СТР, которые вносят весомый вклад в степень совершенства СТР в целом, нами предложен параметр:

$$K_k = \frac{\tau_k}{m_k},$$

где τ_k – ресурс непрерывной работы на орбите, m_k – масса комплектующего аппарата. Вместо ресурса непрерывной работы τ_k можно использовать вероятность безотказной работы на данный ресурс.

В табл. 1 приведены значения K_k некоторых агрегатов СТР КА [3; 4].

Таблица 1

Технические параметры некоторых агрегатов СТР КА

Агрегат СТР КА	Вероятность безотказной работы на назначенный ресурс	Масса, кг	K_k
Клапан заправочный	0,9999	0,4	2,4998
Клапан обратный	0,9999	0,3	3,333
Терморегулятор	0,99	1,8	0,55
Тепловая труба	0,995	1	0,995
Дублированный малорасходный вентилятор	0,993	1	0,993
Малорасходный насос	0,996	2,4	0,415

Специфические требования, которым должен отвечать данный конкретный тип агрегата, должны соответствовать техническому заданию.

Требования к гидравлическим и пневматическим агрегатам должны предусматривать:

- чистоту рабочего тела (газ, жидкость) по содержанию в нём механических примесей, масел, воды и др.;
- отсутствие в конструкции карманов, застойных зон;
- совместимость применённых конструктивных материалов и рабочих сред.

Конструкция любого агрегата КА должна обеспечивать минимальные массу и габариты. Конструкция посадочных и крепёжных мест агрегата выполняется с учётом необходимой жёсткости и рационального размещения в нём сборок и деталей. В конструкции агрегата также необходимо предусмотреть:

- удобный доступ к местам регулировки, юстировки датчиков;
- легкосъёмность кожухов, крышек;
- защиту от внешних воздействующих факторов.

При компоновке агрегатов следует стремиться к тому, чтобы они занимали минимум места в системе, не нарушали тепловые режимы, безопасность эксплуатации и не снижали надёжность систем КА.

Таким образом, при создании агрегатов КА к ним предъявляются повышенные требования по массогабаритным характеристикам, надёжности, гарантированному сроку службы, межрегламентному обслуживанию, точности обработки сигналов управления и ресурсу.

Этапы проектирования и разработки

Исходя из условий и задач, разработка и создание агрегатов КА ведётся поэтапно (рис. 1) [5; 6].

На стадии эскизного проекта разрабатывается техническая документация, дающая общее представление об устройстве и принципе агрегата, содержащая принципиальные конструктивные решения и позволяющая определить основные технические характеристики, габаритно-присоединительные размеры и назначение создаваемого агрегата в составе КА. На стадии рабочего проектирования разработчик создаёт комплект конструкторской документации, включающей ра-

бочие чертежи агрегата, чертежи сборочных единиц, деталей, спецификации, а также чертежи кинематических схем, монтажные, габаритные чертежи, электрические схемы, ведомости покупных комплектующих.

Конструктивные, эксплуатационные, технологические и экономические требования к создаваемой конструкции агрегата часто носят противоречивый характер, и задача конструктора-разработчика заключается в том, чтобы из множества возможных технических решений выбрать наилучшее, полностью отвечающее своему комплексу требований, изложенных в техническом задании.

Учитывая, что надёжность и качество создаваемого агрегата закладывается на стадии проектирования, при выполнении поставленной задачи конструктор-разработчик должен:

- обосновать применение и конструктивное решение агрегата, каждого его механизма и элемента, исходя из эксплуатационных и специальных требований, технологии изготовления на данном производстве, экономичного расходования материалов при обеспечении требуемых тактико-технических характеристик и прочности изделия;

- обеспечить простоту изготовления изделий, удобство сборки, разборки и регулировки, исключая при этом подбор и подгонку деталей, выверку и регулирование их при сборке агрегата;

- предусмотреть в необходимых случаях надёжную автоматическую смазку трущихся поверхностей, исключив применение периодической связи;

- разработать мероприятия по предупреждению коррозии деталей, исходя из условий эксплуатации и применяемых материалов;

- избегать открытых механизмов и передач, исключать попадание грязи, влаги и пыли на трущиеся и вращающиеся поверхности;

- предотвращать самопроизвольное отвинчивание крепёжных деталей;

- предусмотреть блокирующие и предохранительные устройства, исключая возможность поломок и аварий в результате неумелого обращения или экспериментальных условий эксплуатации;

- обеспечить удобство испытаний и проверки выходных параметров.

По созданной разработчиком документации завод-изготовитель изготавливает агрегат.

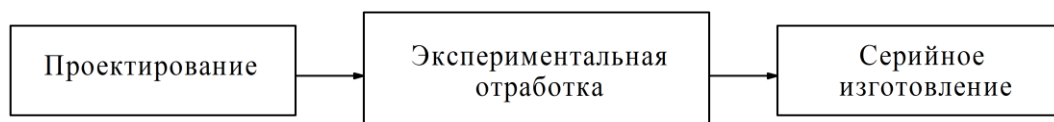


Рис. 1. Этапность создания агрегатов КА

В настоящее время на этапе опытно-конструкторских работ по созданию агрегата в процессе экспериментальной отработки проводится комплекс испытаний по оценке работоспособности агрегата и подтверждению технических и эксплуатационных характеристик создаваемых механизмов. Учитывая, что качество и надёжность спроектированного агрегата подтверждаются на

этапе его экспериментальной отработки (ЭО), принятая методология ЭО агрегата включает этапы: лабораторно-отрабочные испытания (ЛОИ), конструкторско-доводочные испытания (КДИ), чистовые доводочные испытания (ЧДИ) или приемочные испытания (ПРИ), ресурсные испытания (РИ), испытания в составе систем и отработочных изделий (рис. 2).

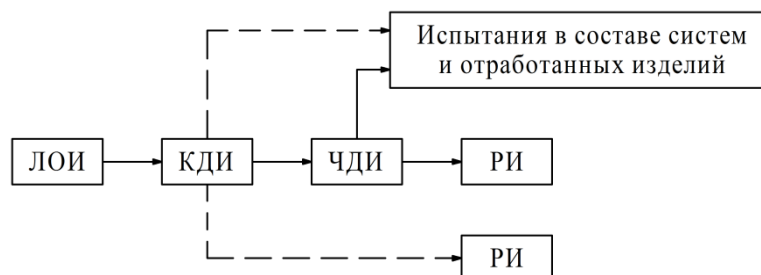


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной отработки агрегатов КА на этапе опытно-конструкторских работ

ЛОИ проводятся разработчиком по составленной им программе на своей испытательной базе с целью экспериментальной проверки принципиальной возможности создания агрегата с требуемыми техническими характеристиками. По результатам ЛОИ разработчик составляет технический отчет, проводит необходимую корректировку конструкторской документации (КД) и дает заключение о допуске агрегата к КДИ. На этапе КДИ экспериментально проверяются заложенные в конструкцию агрегата КА технические решения, соответствие созданной конструкции требованиям технического задания (ТЗ), проводится отработка конструкторской документации, её полноты и достаточности, методик испытаний, заложенных в технических условиях (ТУ), технологических процессов изготовления, сборки, регулировки и испытаний агрегатов. На этапе КДИ производится определение границ работоспособности при различных воздействующих факторах и отработка испытательных средств с целью получения опытного образца агрегата КА, изготовленного в соответствии с требованиями ТЗ, при последующей проверке качества изготовления и сборки агрегата представителем отдела технического контроля (ОТК). По результатам КДИ разработчик вносит необходимые коррективы в КД и даёт заключение о допуске агрегата к этапу ЧДИ, который проводится под контролем представителей заказчика и ОТК с целью экспериментального подтверждения соответствия созданной конструкции агрегата требованиям ТЗ и ТУ с одновременным контролем отработанности технологических процессов изготовления, сборки и испытаний вновь разработанной конструкции агрегата. На данном этапе проводится оценка качества КД, ЭД, их полноты и достаточности, проверка правиль-

ности применения ПКИ, метрологического обеспечения, уровня стандартизации и унификации, определение готовности агрегата к испытаниям в составе системы и отработочных изделий, а также готовность к серийному производству агрегата КА. При положительных результатах ЧДИ (ПРИ) принимается решение о полном соответствии как конструктивного решения агрегата, так и качества технологического обеспечения его изготовления требованиям ТЗ и ТУ. Кроме того, на каждом из вышеназванных этапах агрегаты испытывают на воздействие возмущающих факторов в условиях, адекватных условиям эксплуатации, при этом на каждом последующем этапе проводится проверка правильности технических решений, принятых по результатам испытаний на более раннем этапе. После завершения КДИ и ЧДИ агрегаты устанавливаются на ресурсные испытания с целью экспериментального подтверждения величины заданной гарантийной наработки и оценки запасов агрегата по ресурсу.

В процессе испытаний систем и отработочных изделий, для которых были созданы агрегаты, проверяются и подтверждаются их работоспособность и тактико-технические характеристики. По результатам изложенного комплекса отработочных испытаний разработчиком агрегата составляется итоговый отчет, в котором даётся заключение о передаче агрегата в серийное производство и допуск на протолётную модель.

Агрегаты СТР КА

Состав системы и основные параметры агрегатов.

Состав КА «SESAT» представлен в [7]. Выбор типа и конструкция нагнетателя опреде-

ляются параметрами системы, в которой он выполняет заданные функции, основная из которых – обеспечение подачи рабочего тела с заданным расходом Q_{PT} и напором H . В замкнутой автономной теплоэнергетической системе выделяется тепловой поток $Q_{вн}$, извне подводится тепловой поток $Q_{нар}$, сам объект излучает в окружающее пространство тепловой поток $Q_{изл}$. Тогда уравнение теплового баланса будет иметь вид:

$$\sum_{i=1}^m m_i C_i dT_i = (Q_{нар} - Q_{вн})dt - Q_{изл}dt, \quad (1)$$

где m_i , C_i , T_i – масса, удельная теплоёмкость и температура i -го элемента.

Величина внутреннего теплового потока оценивается по затратам мощности в узлах агрегата и зависит от программы работы оборудования, энергоустановок и системы управления объектом. Наибольшее количество тепла выделяется радиоэлектронной аппаратурой, элементами энергетических и двигательных установок.

Отвод тепла излучением от поверхности площадью F , степенью черноты ϵ можно оценить в первом приближении по уравнению Стефана-Больцмана:

$$Q_{изл} = F\epsilon\sigma T^4, \quad (2)$$

где σ – универсальная постоянная, равная $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²К⁴, T – температура излучаемой поверхности, К [3; 4; 8; 9].

Исходя из основных требований к системе (точности поддержания температуры, экономичности и ресурса работы), выбирается способ охлаждения, при котором тепло отводится за пределы объекта с помощью газообразных или жидких теплоносителей. При этом заданный

температурный режим поддерживается при помощи специальных агрегатов, регулирующих перенос, сбор, перераспределение и передачу тепла, а распределение тепловых потоков внутри объекта обеспечивается насосами, подающими по заданному контуру теплоноситель, или вентиляторами [5].

Определим основные параметры нагнетателей, рассмотрев работу газожидкостной системы терморегулирования (рис. 3). Нагнетатели жидкости, центробежные или шестеренчатые насосы 2, как правило, дублированы, объединены с клапаном перепуска 3 в единый корпус и носят название гидроблока. Насосом 2 жидкость подаётся в теплообменник, откуда уносится тепло, снятое с прибора 6. Снятое тепло подводится в радиатор-излучатель 5 и сбрасывается за пределы охлаждаемого контура. В системе отвода тепла из газового тракта системы охлаждения работает вентилятор 7, подающий воздух через контейнер с прибора 6 на газожидкостный теплообменник 8. Регулирование расхода жидкостей по всей системе осуществляется с помощью датчиков, регуляторов и клапанов. Для стабилизации объёма жидкости в системе из-за её теплового расширения предусмотрен компенсационный бачок 1. По тактико-техническим характеристикам проектируемой системы определяется расход рабочего тела Q_{PT} , потребный напор нагнетателя H и применяемый теплоноситель, выбор которого производится с учетом эксплуатационных характеристик объекта.

Применение насосов и вентиляторов (рис. 3) позволяет создать систему терморегулирования с расходами рабочего тела Q_{PT} у вентилятора до 0,2 м³/с и у насоса до $2,5 \cdot 10^{-4}$ м³/с. Величина напора зависит от компоновки системы подачи, её гидравлического сопротивления и определяется как приращение механической энергии единицы массы рабочего тела, проходящего через нагнетатель:

$$H = H_2 - H_1, \quad (3)$$

где H_2 – полный напор на выходе из нагнетателя; H_1 – напор на входе в нагнетатель.

Уравнение (3) представлено в виде статической $\frac{P_2 - P_1}{\rho}$ и динамической $\frac{C_2^2 - C_1^2}{2}$ составляющих величин напора [3; 4]:

$$H = \frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{C_2^2 - C_1^2}{2}. \quad (4)$$

Данную величину на входе в насос выбирают исходя из необходимого кавитационного запаса:

$$P_1 = \Delta h_{зан}\rho + P_n - \frac{\rho C_1^2}{2} \geq P_{св\beta}. \quad (5)$$

Величину $\Delta h_{зан}$ находят из условия обеспечения работы насоса без кавитации при любых заданных отклонениях параметров системы. Эта

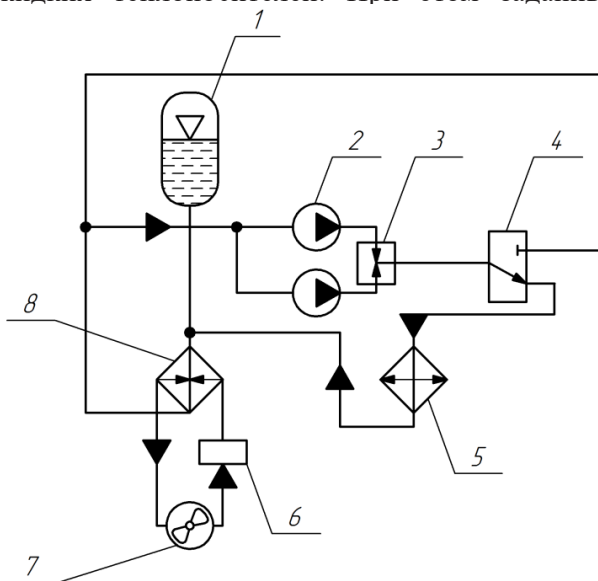


Рис. 3. Принципиальная схема газожидкостной СТР: 1 – компенсационный бачок; 2 – насос; 3, 4 – клапаны; 5 – радиатор-излучатель; 6 – охлаждаемый прибор; 7 – вентилятор; 8 – теплообменник

величина представляет собой требуемое превышение напора на входе над величиной удельной энергии жидкости, соответствующей давлению упругости насыщенных паров данной жидкости.

Величина давления на выходе:

$$\Delta P_c = \sum_{i=1}^n \Delta P_i. \quad (6)$$

где ΔP_c – гидравлическое сопротивление замкнутой системы нагнетателя до его входного сечения, которое включает сумму сопротивлений всех элементов системы, кроме нагнетателя:

$$\Delta P_c = \sum_{i=1}^n \Delta P_i. \quad (7)$$

Величину ΔP_c стремятся получить минимальной, обеспечивая течение рабочего тела по контуру с малыми потерями, исключая по возможности регулируемую арматуру и участки с высокими сопротивлениями. Для нагнетателей газа (вентиляторов) величина ΔP_c составляет 5–10 кг/м² (50–100 Па), для насосов – 0,05–0,1 МПа.

Малые напоры малорасходных нагнетателей обуславливают и низкий уровень потребляемой мощности:

$$N = \frac{Q_{PT} \Delta P_c}{\eta_n}, \quad (8)$$

где η_n – КПД нагнетателя, значение которого изменяется в широких пределах от 0,3 до 0,6. Тогда величина потребляемой мощности в рассмотренной системе составит 5–100 Вт.

Общие требования к агрегатам проектируемой системы в полной мере относятся и к нагнетателям. Кроме этого, к автономным нагнетателям установлены специальные требования:

- высокая надёжность в пределах установленного срока непрерывной работы с возможностью резервирования блоками;
- полная герметичность нагнетателя, привода и всей системы в целом, особенно при работе с высоким ресурсом, когда трудно, а порой и невозможно восполнить потери рабочей среды;
- высокий уровень гидравлических и энергетических параметров;
- минимальные габариты, либо осевые, либо радиальные;
- минимально возможная масса;
- технологичность и себестоимость, которые оцениваются в совокупности для всей проектируемой системы.

Следовательно, возможно применение различных типов нагнетателей жидкости, обеспечивающих заданные малые величины расходов и напоров, имеющих различный принцип действия и конструктивное оформление. На рис. 4 представлены массовые характеристики двух видов электронасосных агрегатов (ЭНА) [3; 4].

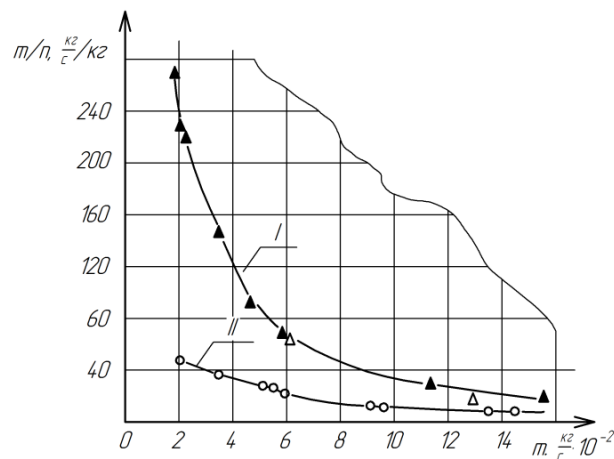


Рис. 4. Массовые характеристики объёмных (I) и лопаточных (II) электронасосных агрегатов (ЭНА)

В качестве нагнетателей газа, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками в заданном диапазоне напора и расхода рабочего тела, в автономных системах нашли широкое применение осевые насосы-вентиляторы.

Малорасходные вентиляторы (МВ).

Малорасходные вентиляторы газа – вентиляторы малой мощности (ВММ) нашли широкое применение в системах кондиционирования и терморегулирования, обеспечивая заданный режим устройств, автономных систем, блоков, приборов и т. п. (рис. 5). Например, для вентиляции орбитальной станции «Салют-6» было установлено несколько десятков различных маломощных вентиляторов с величиной напора в диапазоне 5–100 Па при расходе $Q_{PT} = (1-20) \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ и потребляемой мощностью 1–100 Вт.

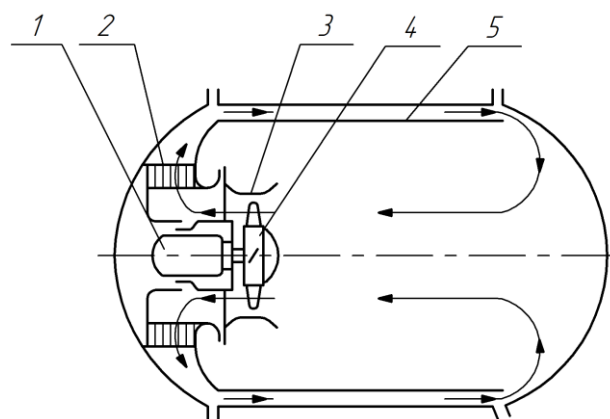


Рис. 5. Схема размещения нерезервированного вентилятора внутри гермоконтейнера:

- 1 – электродвигатель; 2 – газожидкостный теплообменник; 3 – вентилятор; 4 – крыльчатка; 5 – газовод

Схемы последовательного и параллельного резервирования МВ показаны на рис. 6.

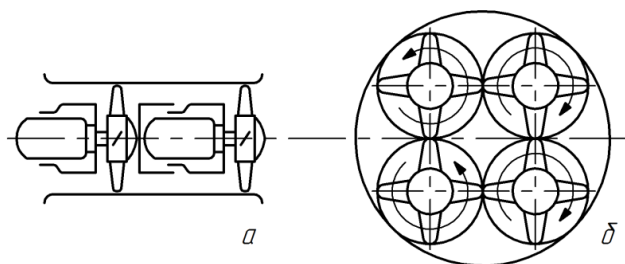


Рис. 6. Схемы последовательного (а) и параллельного (б) резервирования малорасходных вентиляторов

Вентиляторы с флюгерными лопастями отличаются от вентиляторов со складывающимися лопастями существенно меньшими основными габаритами, при этом появляется возможность использовать лопасти резервного вентилятора в качестве направляющего (спрямляющего) агрегата и расширяются возможности по регулированию характеристик МВ за счет поворота лопастей на больший угол.

При установке более двух вентиляторов вдоль общей оси выбирают МВ со складывающимися лопастями, которые в сложенном положении освобождают проточную часть и не создают аэродинамического сопротивления. МВ последовательного типа с жестким креплением лопастей из-за высокого аэродинамического сопротивления, оказываемого резервным рабочим колесом, были заменены на МВ с шарнирными креплениями лопастей. Для некоторых лопастей и втулок относительно больших диаметров, например с торцевыми электродвигателями, имеющими минимальный осевой габарит, можно использовать конструкцию МВ с лопастями, выстреливающими под действием центробежных сил из ступицы рабочего колеса в прочную часть по радиальному направлению.

МВ параллельного типа подразделяются на МВ с закрывающимися стволами и открытыми отводами. Последние нашли применение при совмещении всех вентиляторов. В случае отказа одного работают остальные (при этом резко ухудшаются суммарные аэродинамические характеристики МВ). Срок непрерывной работы таких МВ достигает 110000 часов. МВ параллельного типа с закрывающимися отводами имеют осевые габариты и регулируют режим работы в зависимости от числа включаемых вентиляторов. В МВ со стволами, закрывающимися лопастями рабочей крыльчатки, применяются плоские профили без закрутки с низким КПД. Закрывающиеся лопасти направляющего (спрямляющего) агрегата из-за сложной кинематической схемы механизма закрытия характеризуются пониженной надежностью. Возможен вариант управления поворотом данных лопастей аэродинамическими силами и др. Из МВ

со стволами, закрывающимися заслонкой, наиболее перспективны МВ с параллельной компоновкой, поскольку они дают широкие возможности многократного дублирования и регулирования входных параметров в процессе работы с минимальными осевыми размерами. Различают МВ с аэродинамической заслонкой и с заслонкой, имеющей привод. Аэродинамическая заслонка шарнирно установлена между смежными стволами. Поток работающего вентилятора перебрасывает заслонку на резервный и тем самым закрывает его. Устойчивая работа заслонки достигается использованием специального канала, обеспечивающего осевое направление потока на выходе стволов.

Для регулирования расхода газа в зависимости от его температуры применяют ВММ с лопастями из сплава, обладающего эффектом «памяти», например, из никелида титана и т. п. [10; 11]. При повышенной температуре окружающей среды, близкой к значению упругости восстановления материала лопастей, изменяются углы её закрутки и установки профиля. Расход воздуха через вентилятор повышается, а энергопотребление оптимизируется в соответствии с расходом благодаря оптимальному аэродинамическому качеству лопастей при расчётном числе оборотов привода. При понижении температуры лопасти возвращаются в исходное состояние. Расход воздуха через вентилятор уменьшается, аэродинамическое качество лопастей остается высоким при меньшей нагрузке. Промежуточным значениям температуры соответствуют промежуточные геометрические характеристики лопастей, которые изменяются по линейному закону в зависимости от температуры. Таким образом, лопасти рабочего колеса вентилятора из сплавов с эффектом «памяти формы» позволяют повысить надёжность и экономичность вентилятора при изменении температуры окружающей среды.

В МВ с муфтами, соединяющими электродвигатели с рабочими колесами при наличии свободного места вдоль оси (для осевого перемещения рабочего колеса примерно на половину его ширины), выполняется «холодное» резервирование без дополнительных опор.

Заключение

Анализ требований как к системе терморегулирования в целом, так и ко всем составляющим агрегатам с учётом особенностей их проектирования, разработки и экспериментальной отработки, а также достигнутые результаты надёжности, в частности, КА «SESAT», в котором МВ проработал непрерывно 18 лет, позволяют сделать вывод о возможности разработки агрегатов системы терморегулирования на любой требуемый ресурс с обеспечением их надёжной работы в составе КА.

Полученные данные могут быть полезны при проектировании систем жизнеобеспечения орбитальных станций и космических аппаратов для межпланетных пилотируемых полетов, а также использованы для обеспечения необходимой

надёжности агрегатов аналогичного назначения в наземной технике, автономно работающей в экстремальных условиях, например, при предотвращении и ликвидации чрезвычайных ситуаций.

Список литературы

- [1] История развития отечественных автоматических космических аппаратов. М. : ООО «Издательский дом «Столичная энциклопедия», 2015. 752 с.
- [2] SESAT (спутник) [Электронный ресурс]. URL: <http://fakty-o.ru/sesat#> (дата обращения 24.07.2014).
- [3] Агрегаты автономных энергетических систем : учеб. пособие / Е. Н. Головёнкин [и др.] под ред. К. Г. Смирнова-Васильева ; КрПИ. Красноярск, 1986. 89 с.
- [4] Двирный В. В., Краев М. В. Малорасходные автономные нагнетатели. Изд-во Краснояр. ун-та, 1985. 152 с.
- [5] Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосм. ун-т. Красноярск, 2011. 488 с.
- [6] Патраев В. Е., Максимов Ю. В. Методы поэтапного обеспечения надежности бортовой аппаратуры космических аппаратов со сроками активного действия 10–15 лет / Космические вехи : сб. науч. тр. Красноярск : ИП Суходольская Ю. П., 2009. С. 445–457.
- [7] Технология производства космических аппаратов : учеб. для вузов / Н. А. Тестоедов [и др.] ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2009. 352 с.
- [8] Королёв С. И. Системы обеспечения теплового режима космического аппарата : учеб. пособие. СПб. : Балтийский гос. техн. ун-т, 2006. 91 с.
- [9] Атамасов В. Д., Ермолаев В. И., Кукушкин И. О. Система обеспечения теплового режима космического аппарата : учеб. пособие. СПб. : Изд-во МО РФ, 2003. 71 с.
- [10] Jani J. M., Leary M., Subic A., Gibson M. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities // *Materials & Design*, 2014, vol. 56, pp. 1078–1113.
- [11] Qidwai M. A., Lagoudas D. C. On thermomechanics and transformation surfaces of polycrystalline NiTi shape memory alloy material // *International Journal of Plasticity*, 2000, vol. 16, issue 10–11, pp. 1309–1343.

FEATURES OF COMPONENTS OF SPACECRAFT THERMAL CONTROL SYSTEMS

V. V. Dvirniy^{1,2}, G. G. Krushenko³, G. V. Dvirniy⁴, A. A. Shevchuk^{1,2},
M. V. Elfimova⁵, M. S. Kuznetsova²

¹JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems,
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation

²Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

³Institute of Computational Modelling SB RAS, FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russian Federation

⁴Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation

⁵Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia,
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation

The main indicators of the spacecraft quality are their reliability and the period of active existence at orbit, and their temperature regime plays a significant role in this. One of the main tasks of the thermal control system is to ensure a given thermal regime, which ensures the stable operation of all systems within the spacecraft volume. For this, special aggregates are required: pumps for feeding a coolant along a given circuit, fans and others that regulate the collection, transfer and redistribution of heat. Both the thermal control system as a whole and all its aggregates that make it up are subject to high requirements, including in terms of weight and dimensions, guaranteed service life and reliability. We proposed the parameter of perfection of the thermal control system components. The main stages of design, development and experimental testing of spacecraft units are shown. We considered in details the principles of operation and the composition of thermal control systems, especially the basic parameters

and the structure of their components which are various types of liquid pumps and low-flow gas fans with low power consumption that provide specified small flow rates and pressures with high reliability within the established period of continuous operation, including using redundancy. As a result of the improvement of the thermal regulation system, along with the improvement of other life support systems, the duration of the active existence of satellites currently reaches 15 years.

Keywords: thermal control system, complementary aggregates, low-flow fans, redundancy, geometric characteristics of blades.

References

- [1] *Istoriya razvitiya otechestvennykh avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov* [The history of the development of domestic automatic spacecraft]. Moscow, OOO «Izdatel'skiy dom «Stolichnaya entsiklopediya»», 2015. 752 p. (In Russian)
- [2] SESAT (satellite). Available at: <http://fakty-o.ru/sesat#> (accessed 24.07.2014)
- [3] Golovenkin E. N., Dvirnyy V. V., Kovalev N. A., Kraev M. V., Ruzanov V. P., Smirnov-Vasil'yev K. G. *Agregaty avtonomnykh energeticheskikh sistem : ucheb.posobiye* [Assemblies of autonomous energy systems]. Krasnoyarsk, KrPI Publ, 1986. 89 p. (In Russian)
- [4] Dvirnyy V. V., Kraev M. V. *Maloraskhodnyye avtonomnyye nagnetateli* [Low consumption self-contained blowers]. Krasnoyarsk, KSU Publ., 1985. 152 p. (In Russian)
- [5] Chebotarev V. E., Kosenko V. E. *Osnovy proektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya* [Fundamentals of spacecraft design information support]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2011, 488 p. (In Russian)
- [6] Patraev V. E., Maksimov Ju. V. *Metody pojetapnogo obespecheniya nadezhnosti bortovoj apparatury kosmicheskikh apparatov so srokami aktivnogo dejstviya 10-15 let* [Methods for the phased reliability procuring of on-board equipment of the spacecraft with the terms active steps 10-15 years] / *Kosmicheskie vehi: sbornik nauchnykh trudov* [Space milestone: collection of scientific works]. Krasnoyarsk, IP Suhodol'skaja Ju. Publ., 2009, pp. 445–457. (In Russian)
- [7] Testoyedov N. A., Mihnev M. M., Miheev A. E. *Tehnologiya proizvodstva kosmicheskikh apparatov* [Production technology of spacecraft]. Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2009, 352 p. (In Russian)
- [8] Korolev S. I. *Sistemy obespecheniya teplovogo rezhima kosmicheskogo apparata* [System for thermal regime of the spacecraft]. St. Petersburg, BSTU Publ., 2006, 91 p. (In Russian)
- [9] Atamasov V. D., Ermolaev V. I., Kukushkin I. O. *Sistema obespecheniya teplovogo rezhima kosmicheskogo apparata* [System for thermal regime of the spacecraft]. St. Petersburg, MO RF Publ., 2003, 71 p. (In Russian)
- [10] Jani J. M., Leary M., Subic A., Gibson M. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities // *Materials & Design*, 2014, vol. 56, pp. 1078–1113.
- [11] Qidwai M. A., Lagoudas D. C. On thermomechanics and transformation surfaces of polycrystalline NiTi shape memory alloy material // *International Journal of Plasticity*, 2000, vol. 16, issue 10–11, pp. 1309–1343.

ПОСТРОЕНИЕ НЕЧЁТКИХ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ОБЪЕКТОВ В СРЕДЕ SimInTech

В. А. Мызникова, В. В. Устименко, А. В. Чубарь ✉

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация

Рассматривается управление автономным объектом на примере системы управления угловым положением искусственного спутника Земли. Представлена функциональная схема и упрощённая математическая модель системы автоматического управления угловым положением в виде структурной схемы, уравнения и передаточных функций её звеньев. Модель реализована в среде визуального динамического моделирования SimInTech в виде субмоделей, взаимосвязанных через базу данных сигналов. Рассмотрено управление объектом с использованием инерционно-дифференцирующего аналогового регулятора, дискретного ПИД-регулятора, а также регулятора на основе математической нечёткой логики. Проведена настройка параметров регуляторов с использованием типового блока «Оптимизация» в составе SimInTech. Критериями являются интегральная ошибка регулирования и максимальное значение регулируемой величины. На основе типовых блоков SimInTech построена и протестирована модель регулятора на основе нечёткой логики. Показаны особенности и основные шаги построения нечётких регуляторов в среде SimInTech. Сформулированы и описаны в виде лингвистических выражений правила нечёткого регулирования для управления угловым положением объекта. Представлены результаты моделирования системы с применением регуляторов различного типа.

Ключевые слова: модель, регулятор, проектирование, визуальное моделирование, нечёткая логика.

Введение

Стадия проектирования является определяющей в жизненном цикле изделий штучного и мелкосерийного производства. Использование интегрированных систем проектирования технических устройств позволяет повысить их качество и сократить сроки разработки.

Одним из перспективных средств моделирования и разработки робототехнических и других сложных систем является среда визуального моделирования SimInTech [1; 2; 7–9], которая обеспечивает:

- создание моделей технических устройств в виде структурных блок-схем;
- математическое моделирование их режимов на основе дифференциальных уравнений;
- создание составных моделей технических объектов из готовых блоков – моделей оборудования;
- интеграцию в единую комплексную модель;

- отладку алгоритмов управления на модели и реальном объекте;
- автоматическую генерацию кода управляющих программ;
- автоматизацию выпуска конструкторской документации.

Одной из основных особенностей использования SimInTech для создания комплексных моделей является идеология использования «Базы данных сигналов» – структурированного списка переменных, обеспечивающих обмен расчётными значениями между расчётными схемами в единой модели. База данных сигналов SimInTech является объектной и обеспечивает пользователю удобное решение следующих задач:

- объединение нескольких расчётных схем в единую модель;
- обеспечение возможности векторной обработки сигналов для типовых алгоритмов управления;
- объектно-ориентированное проектирование модели технических систем;
- автоматизация создания и обработки переменных в комплексных моделях.

Для создания сложной математической модели происходит объединение моделей основных

✉ alexchub@mail.ru

© Мызникова В. А., Устименко В. В., Чубарь А. В., 2019

подсистем, реализованных в виде отдельных проектов, в единый пакет. В настоящее время пакет SimInTech используется на ряде предприятий ракетно-космической техники.

Во многих отраслях промышленности в отношении технических систем, характеристики которых в процессе работы могут изменяться в широком диапазоне, применяют алгоритм нечёткой логики [3; 4; 6].

Некоторые задачи, выполняемые искусственными спутниками Земли (ИСЗ), могут потребовать постоянного определения его местонахождения относительно Земли. В этом случае ИСЗ в любой момент полёта по орбите должен определять свои географические координаты и высоту над поверхностью Земли.

Эта задача является весьма сложной, и ее решение будет одним из основных факторов, отличающих автоматизированный ИСЗ от неавтоматизированного. Наиболее совершенными будут стабилизированные автоматизированные ИСЗ, которые должны занимать строго определенное, известное положение в пространстве [10; 11].

Стабилизация угловых положений ИСЗ на орбите необходима, во-первых, для удержания поверхности солнечной батареи в направлении на Солнце и, во-вторых, для придания определённого положения ИСЗ относительно Земли с целью автоматического фотографирования определённых участков земной поверхности, более надёжной связи с Землей, наблюдения за движением льдов, масс облаков, спасения кассет с результатами научных наблюдений и т. д.

Рассмотрим процесс построения нечёткого регулятора в среде SimInTech на примере системы управления угловым положением искусственного спутника Земли.

Постановка задачи

По заданной математической модели автономного объекта необходимо реализовать в среде SimInTech управление аналоговым, дискретным и нечётким регулятором. Также необходимо осуществить реализацию регуляторов и произвести настройку их параметров, и, затем, сравнить полученные результаты.

Динамическая модель объекта

Функциональная схема и исходные данные автономного объекта представлены в [5]. В качестве примера рассмотрим систему управления угловым положением ИСЗ (рис. 1).

Создадим динамическую модель (рис. 2) в среде структурного моделирования SimInTech функциональной схемы (рис. 1) по уравнениям её элементов [2].

Передаточная функция аналогового корректирующего устройства (КУ):

$$W_1 = \frac{u_3}{u_2} = \frac{k_{ky} \cdot p}{T_{ky} \cdot p + 1}.$$

Передаточная функция маховичного исполнительного органа по напряжению:

$$W_2 = \frac{M_y(p)}{\varphi(p)} = -\frac{k_{ио} \cdot k_{ос} \cdot p}{T_{ио} \cdot p + 1} = \frac{30p}{5p + 1}.$$

Передаточная функция корпуса ИСЗ:

$$W_3 = \frac{1}{T_{исз} \cdot p^2} = \frac{1}{1000 \cdot p^2}.$$

Здесь $k = 2$, $k_u = 10$, $k_m = 0,5$ – коэффициенты усилителя корректирующего устройства, усилителя напряжения и усилителя мощности соответственно.

Применяя блок оптимизации, проведём настройку параметров аналогового регулятора в плоскости его параметров k_{ky} и T_{ky} .

Кривая регулирования аналогового инерционно-дифференцирующего КУ представлена на рис. 6 под цифрой 1.

Статическая ошибка регулирования составляет 10 %. Дальнейшее уменьшение ошибки за счёт увеличения коэффициента k_{ky} невозможно, т. к. существенно снижается запас устойчивости системы.

Построение регуляторов

Для повышения точности ориентации объекта включим на вход системы дискретный ПИД-регулятор (рис. 3).

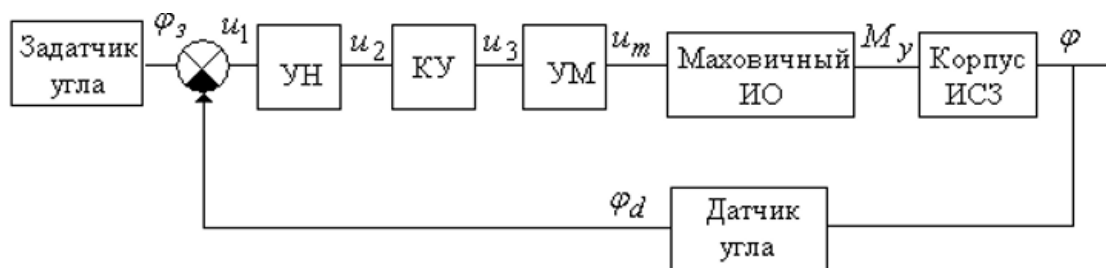


Рис. 1. Функциональная схема системы управления угловым положением искусственного спутника Земли [5]

Блок дискретного ПИД-регулятора представляет из себя субмодель, в которой используется стандартный блок «Дискретный ПИД-регулятор». Период квантования задан равным 0,001 и использован стандартный блок оптимизации среды SimInTech.

Параметры регулятора K_p , K_i , K_d – пропорциональная, интегральная и дифференциальная составляющие соответственно – задаются в виде глобальных переменных и вносятся в блок «Сигналы». Для настройки регулятора используется блок «Оптимизация». В качестве метода оптимизации применяется симплекс-метод.

В результате оптимизации вектор из трёх коэффициентов (составляющих) направляется в блок «Запись в список сигналов», откуда вычисленные значения перенаправляются в дискретный ПИД-регулятор, изменяя его параметры. В блоке

«Оптимизация» заданы следующие свойства: абсолютная точность подбора значений выходов – 0,01, начальное приближение выходов блока – 1, минимальное значение выходов блока – 0.

В рассматриваемом случае блок оптимизации рассчитал следующие оптимальные значения коэффициентов: $K_p = 1,5$, $K_i = 0,1$, $K_d = 4,5$.

Результаты моделирования представлены на рис. 6 под цифрой 2.

Далее реализуем регулятор на базе нечёткой логики [3; 6].

Для начала выполним фазификацию входной переменной. Наш блок будет получать на вход одно значение и оценивать его, насколько данная величина соответствует заданным в параметрах термам. Мы будем расчленять исходную величину на несколько термов, рассчитывая для каждого терма функцию принадлежности $\mu(x)$ типа кривой Гаусса.

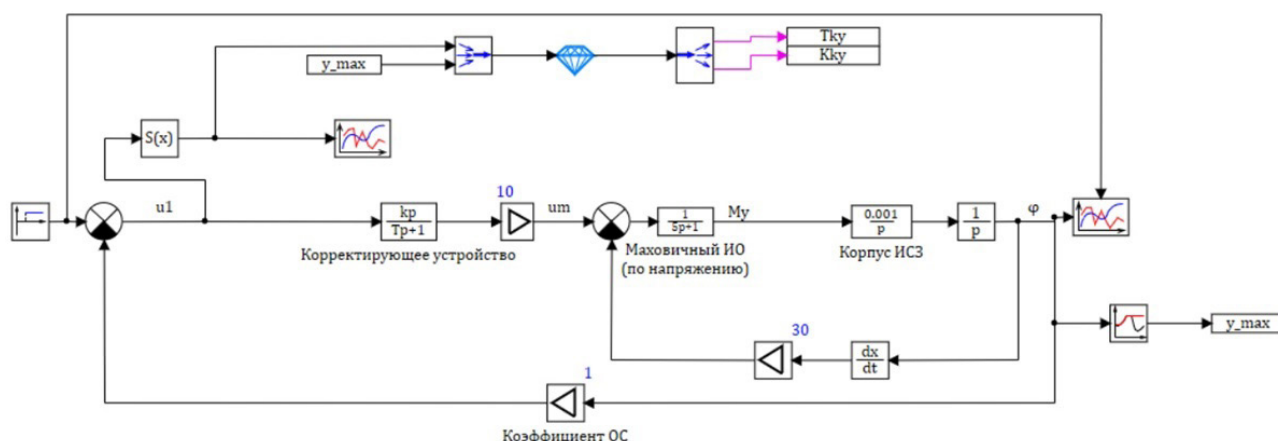


Рис. 2. Динамическая модель системы, реализованная в проекте SimInTech

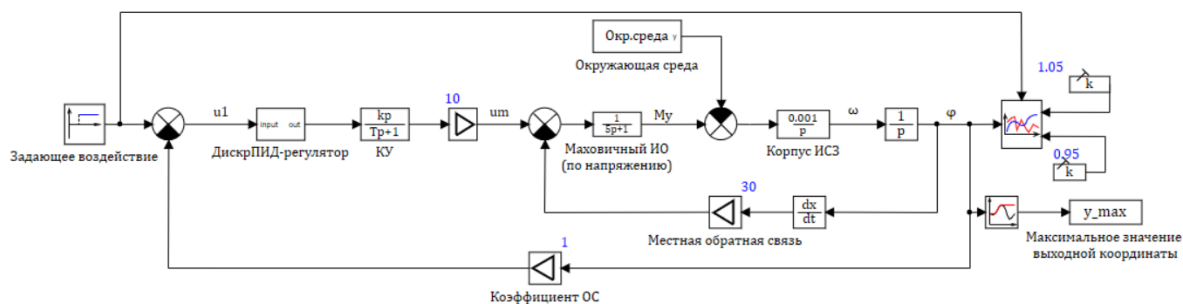


Рис. 3. Динамическая модель системы управления угловым положением ИСЗ с применением дискретного ПИД-регулятора

В базе правил нечёткой логики будем использовать следующие терма:

1. Для отклонения: меньше нормы, норма, больше нормы.
2. Для скорости: увеличивается, не изменяется, падает.
3. Для ускорения: ускоряется, не изменяется, замедляется.

Выход тоже будет иметь три лингвистические переменные: «уменьшать», «не изменять», «увеличивать».

Сформулируем правила нечёткого регулирования для управления угловым положением объекта и опишем их в виде лингвистических выражений:

1. Если больше нормы и отклонение растёт, а скорость роста увеличивается, то уменьшаем.
2. Если норма и отклонение не изменяется, а скорость постоянна, то не изменяем.
3. Если меньше нормы и отклонение падает, а скорость падения увеличивается, то увеличиваем.

Для удобства зададим следующие параметры в глобальные переменные и оптимизи-

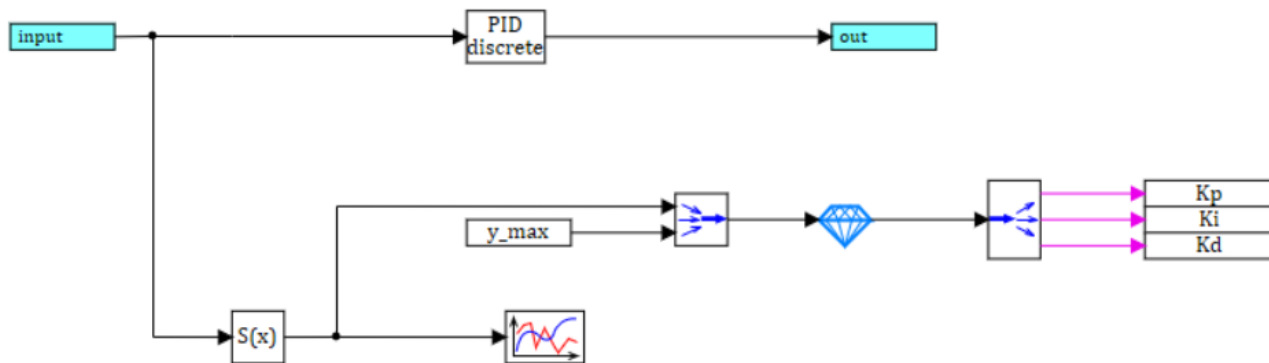


Рис. 4. Содержимое субмодели дискретного регулятора

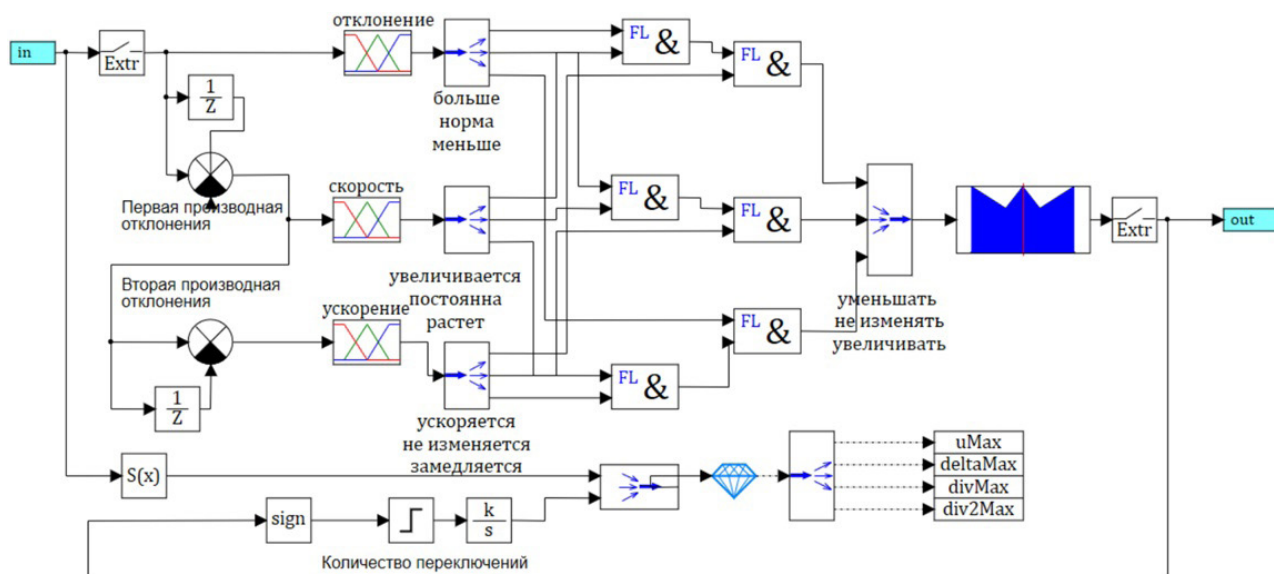


Рис. 5. Содержимое субмодели нечёткого регулятора

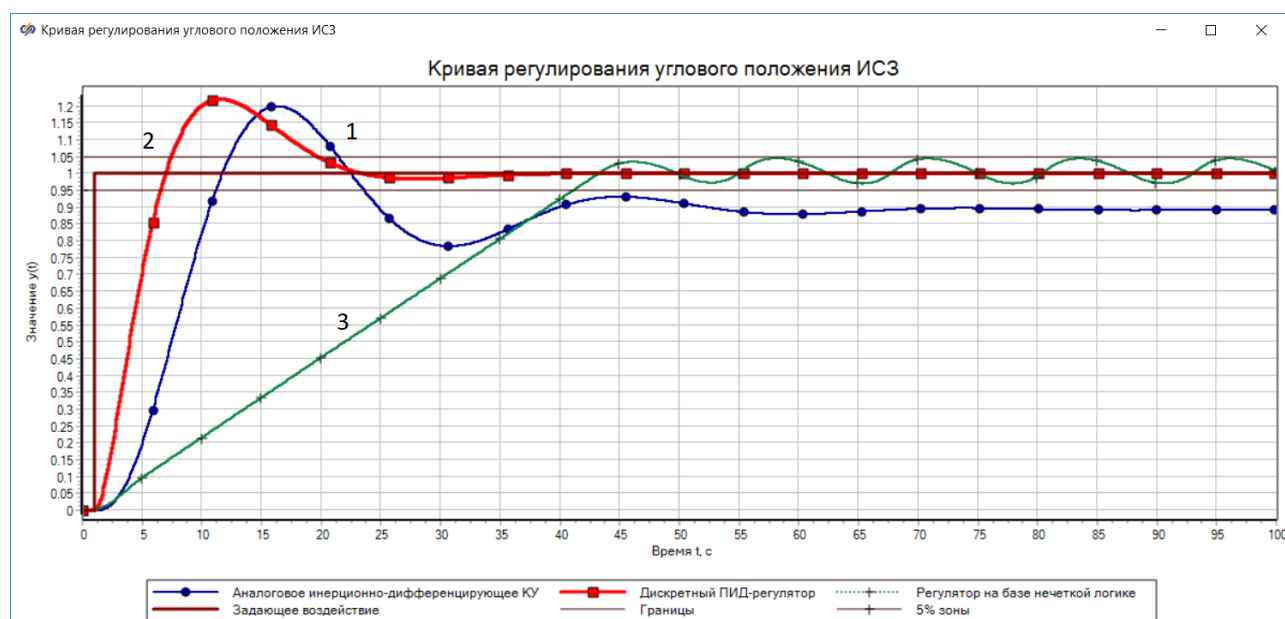


Рис. 6. Результаты моделирования системы с применением регуляторов различного типа

руем их при помощи блока оптимизации среды SimInTech:

1. $uMax$ – амплитуда управляющего воздействия;
2. $deltaMax$ – максимальное отклонение;
3. $divMax$ – максимальная производная отклонения;
4. $div2Max$ – максимальная вторая производная отклонения.

Заключение

На основе типовых блоков SimInTech построена и протестирована модель регулятора на основе нечёткой логики, проведена настройка па-

раметров модели при помощи блока оптимизации среды SimInTech.

Выполнено моделирование системы управления угловым положением ИСЗ с использованием инерционно-дифференцирующего аналогового регулятора, дискретного ПИД-регулятора, а также регулятора на основе нечёткой логики.

Регулятор на базе нечёткой логики обеспечивает качество переходного процесса, сопоставимое с ПИД-регулятором, обеспечивая при этом большую гибкость в настройке, но требует настройки большего количества параметров.

Аналогично в среде SimInTech могут быть построены нечёткие регуляторы для управления другими автономными объектами.

Список литературы

- [1] Карташов Б. А., Козлов О. С., Шабаетов Е. А., Щекатуров А. М. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech. М. : ДМК Пресс, 2017. 424 с.
- [2] Грищенко И. А., Чубарь А. В. Создание математической модели робота с дифференциальным приводом // Материалы II Междунар. науч.-практ. конференции «Научно-технический прогресс: актуальные и перспективные направления будущего» / ООО «Западно-Сибирский научный центр». Кемерово, 2016. С. 35–27.
- [3] Простой регулятор на базе нечеткой логики. Создание и настройка [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/post/413539/> (дата обращения: 06.03.2019)
- [4] Гостев В. И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. Киев : Радиоаматор, 2008. 972 с.
- [5] Воронин А. В. Теория автоматического управления. Основы построения и анализа систем автоматического регулирования : учеб.-метод. пособие. Томск : Издательство Томского политехнического университета, 2013. 51 с.
- [6] Мызникова В. А., Устименко В. В., Чубарь А. В. Построение нечетких регуляторов в среде SimInTech // Материалы X Всеросс. науч.-техн. конференции с междунар. участием «Робототехника и искусственный интеллект» / Сибирский федеральный университет. Красноярск, 2018. С. 223–228.
- [7] Козлов О. С., Кондаков Д. Е., Скворцов Л. М. и др. Программный комплекс для исследования динамики и проектирования технических систем // Информационные технологии. 2005. № 9. С. 20–25.
- [8] Пожаркова И. Н., Чубарь А. В., Киселев О. И., Лагунов А. Н. Система контроля безопасности транспортного контейнера // Научно-аналитический журнал «Сибирский пожарно-спасательный вестник». 2018. № 3. С. 23–32.
- [9] Пожаркова И. Н., Чубарь А. В., Грищенко И. А., Трояк Е. Ю. Моделирование технологического процесса в среде визуального моделирования SimInTech // Научно-аналитический журнал «Сибирский пожарно-спасательный вестник». 2018. № 2. С. 29–37.
- [10] Александров А. Ю., Тихонов А. А. Электродинамическая стабилизация ИСЗ на экваториальной орбите // Космические исследования. 2012. Т. 50, № 4. С. 335–340.
- [11] Тихонов А. А., Спасич Д. Т., Антипов К. А., Саблина М. В. Оптимизация электродинамического метода стабилизации искусственного спутника Земли // Автоматика и телемеханика. 2011. № 9. С. 112–120.

FUZZY CONTROLLERS CONSTRUCTION IN THE SimInTech ENVIRONMENT

V. A. Myznikova, V. V. Ustimenko, A. V. Chubar
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

The control of an autonomous object on the example of the control system of the angular position of an artificial Earth satellite is considered. The functional scheme and the simplified mathematical model of automatic control system by angular position in the form of the block diagram, equations and transfer

functions of its links are presented. The model is implemented in the SimInTech visual dynamic modeling environment as submodels interconnected through a database of signals. The control of the object by using an inertial-differentiating analog controller, a discrete PID controller, and a controller based on mathematical fuzzy logic is considered. Customizing parameters of controllers using the model «Optimization» in the SimInTech. The criteria are the integral control error and the maximum value of the controlled value. Based on standard blocks of SimInTech the model of controller on the basis of fuzzy logic are built and tested. Features and basic stages of fuzzy controller construction in SimInTech environment are shown. The rules of fuzzy control for controlling the angular position of an object are formulated and described as linguistic manifestations. The results of the system modeling using various types of controllers are presented.

Keywords: model, controller, design, visual modeling, fuzzy logic.

References

- [1] Kartashov B. A., Kozlov O. S., Shabaev E. A., Shchekaturov A. M. *Sreda dinamicheskogo modelirovaniya tekhnicheskikh sistem SimInTech* [Environment of dynamic modeling of technical systems SimInTech]. Moscow, DMK Press, 2017, 424 p. (In Russian)
- [2] Grishchenko I. A., Chubar A. V. *Sozдание matematicheskoy modeli robota s differentsial'nym privodom* [Creating a mathematical model of a robot with a differential drive] // *Materialy II Mezhdunar. nauch.-prakt. konferencii «Nauchno-tekhnicheskij progress: aktual'nye i perspektivnye napravleniya budushchego»* [Proceedings of the II Intern. scientific-practical Conference «Scientific and Technical Progress: Actual and Promising Future Directions»] / West-Siberian Scientific Center LLC. Kemerovo, 2016. pp. 35–27. (In Russian)
- [3] A simple controller based on fuzzy logic. Creating and setting. Available at: <https://habr.com/post/413539/> (accessed: 06.03.2019)
- [4] Gostev V. I. *Nechetkie regulatory v sistemah avtomaticheskogo upravleniya* [Fuzzy regulators in automatic control systems]. Kiev, Radioamator, 2008, 972 p. (In Russian)
- [5] Voronin A. V. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Osnovy postroeniya i analiza sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* [Theory of automatic control. Fundamentals of construction and analysis of automatic control systems]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Press, 2013, 51 p. (In Russian)
- [6] Myznikova V. A., Ustimenko V. V., Chubar A. V. *Postroenie nechetkikh regulyatorov v srede SimInTech* [Construction of Fuzzy Controllers in the SimInTech Environment] // *Materialy X Vseross. nauch.-tekhn. konferencii s mezhdunar. uchastiem «Robototekhnika i iskusstvennyj intellekt»* [Proceedings of the X Vseross. scientific and technical conference with int. participation «Robotics and artificial intelligence»] / Siberian Federal University. Krasnoyarsk, 2018. pp. 223–228. (In Russian)
- [7] Kozlov O. S., Kondakov D. E., Skvortsov L. M. *Programmnyy kompleks dlya issledovaniya dinamiki i proektirovaniya tekhnicheskikh sistem* [Software package for the study of the dynamics and design of technical systems] // *Information Technologies*, 2005, no. 9, pp. 20–25. (In Russian)
- [8] Pozharkova I. N., Chubar A. V., Kiselev O. I., Lagunov A. N. *Sistema kontrolya bezopasnosti transportnogo kontejnera* [Transport Container Security Monitoring System] // *Scientific and Analytical Journal «Siberian Fire and Rescue Bulletin»*, 2018, no. 3, pp. 23–32. (In Russian)
- [9] Pozharkova I. N., Chubar A. V., Gryshchenko I. A., Troyak E. Yu. *Modelirovanie tekhnologicheskogo processa v srede vizual'nogo modelirovaniya SimInTech* [Simulation of the technological process in the SimInTech visual modeling environment] // *Scientific and analytical journal «Siberian Fire and Rescue Bulletin»*, 2018, no. 2, pp. 29–37. (In Russian)
- [10] Aleksandrov A. Yu., Tikhonov A. A. *Elektrodinamicheskaya stabilizatsiya ISZ na ehkvatorial'noj orbite* [Electrodynamic stabilization of an artificial satellite in the equatorial orbit] // *Space Research*, 2012, vol. 50, no. 4, pp. 335–340. (In Russian)
- [11] Tikhonov A. A., Spasich D. T., Antipov K. A., Sablina M. V. *Optimizatsiya ehlektrodinamicheskogo metoda stabilizatsii iskusstvennogo sputnika Zemli* [Optimization of the electrodynamic method for stabilizing an artificial Earth satellite] // *Automation and Remote Control*, 2011, no. 9, pp. 112–120. (In Russian)

ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПЕРСПЕКТИВНОГО СВЕТОДИОДНОГО ИМИТАТОРА СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ НАЗЕМНОЙ ОТРАБОТКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. А. Шевчук^{1, 2} ✉, Г. В. Двирный³, Г. Г. Крушенко⁴,
В. В. Двирный^{1, 2}, М. В. Елфимова⁵

¹АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва»,
г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация

²Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация

³Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М. Ф. Решетнёва,
г. Красноярск, Российская Федерация

⁴Институт вычислительного моделирования СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН,
г. Красноярск, Российская Федерация

⁵Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация

Переход к производству космических аппаратов нового поколения требует значительного совершенствования методов и средств наземной экспериментальной отработки, повышения точности испытательного оборудования. Одним из базовых и наиболее сложных элементов испытательного оборудования, применяемого при комплексных термовакуумных испытаниях космических аппаратов, является имитатор солнечного излучения. В настоящее время перспективным направлением считается построение имитаторов солнечного излучения на основе высокоэффективных светодиодов, имеющих значительные преимущества перед традиционными источниками. В числе основных задач при создании светодиодного имитатора солнечного излучения, адаптированного для наземной отработки космических аппаратов, находится разработка высокоэффективной и, в то же время, компактной оптической системы, суммирующей с минимальными потерями излучение множества отдельных светодиодов светодиодной матрицы по спектру, углу и площади в однородное световое поле. В статье проанализированы результаты математического моделирования светового источника светодиодного имитатора солнечного излучения на примере нескольких моделей с различным числом светодиодов, как без оптических элементов, так и с различными первичными оптическими элементами. Из результатов следует, что светодиодный имитатор солнечного излучения обязательно должен иметь, как минимум, первичную оптическую систему. Определено влияние количества, типа и размера первичных оптических элементов в матрице на характеристики светового потока. Совместное применение первичной и вторичной оптических систем приводит к дальнейшему повышению световых характеристик светодиодного имитатора солнечного излучения, но ценой некоторого снижения общей эффективности. В целом характеристики смоделированного светового источника соответствуют или вплотную приближаются к требуемым, что говорит о принципиальной возможности создания имитатора солнечного излучения на основе светодиодных источников для наземной отработки космических аппаратов.

Ключевые слова: космический аппарат, наземная отработка, термовакуумные испытания, имитатор солнечного излучения, оптическая система, светоизлучающий диод.

Введение

Развитие многих отраслей народного хозяйства и ряда направлений научных исследований се-

годня невозможно без использования искусственных спутников Земли. Одним из наиболее успешных и динамично развивающихся инновационных направлений сегодня считается, в частности, космический мониторинг. Помимо традиционной военной и разведывательной сферы, приоритетным направлением космического мониторинга является ликвидация последствий чрезвычайных ситу-

✉ expert-zh24@yandex.ru

© Шевчук А. А., Двирный Г. В., Крушенко Г. Г.,
Двирный В. В., Елфимова М. В., 2019

аций. Так, Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (МЧС) России для обработки космической информации задействует пять наземных комплексов. В 2018 году система космического мониторинга МЧС задействовала комплексы более чем в 130 чрезвычайных ситуациях и обработала более двух тысяч снимков, благодаря чему оперативно отреагировала более чем на 115 тысячах термических аномалиях. Сейчас космическая группировка МЧС России насчитывает двенадцать спутников, из которых восемь отечественного производства.

Надежность как космического аппарата в целом, так и его отдельных систем подтверждается на этапе проведения ключевых наземных испытаний – наземной экспериментальной отработки. Вероятность безотказной работы космического аппарата (КА) напрямую зависит от качества экспериментальной отработки, а переход к производству негерметичных КА нового поколения требует дальнейшего усовершенствования её методов и средств.

Одним из базовых и наиболее сложных элементов испытательного оборудования, применяемого при комплексных термовакuumных испытаниях КА, является имитатор солнечного излучения (ИСИ), с необходимой точностью имитирующий солнечное воздействие на КА при орбитальном функционировании. Так, существующие в настоящее время отечественные ИСИ отвечают следую-

щим основным требованиям:

- удельная мощность светового потока 1340–1440 Вт/м²;
- неравномерность энергетической освещенности до $\pm 10\%$;
- спектральный диапазон, близкий к диапазону солнечного излучения в области 200–2000 нм, с несоответствием не более 10 % от номинальных значений.

Излучение Солнца в условиях открытого космоса исключительно прямое, в отличие от земных условий, где даже в условиях ясного неба на долю рассеянного излучения приходится 10–15 %. Поэтому непараллельность светового потока существующих отечественных ИСИ для околоземной орбиты нормируется в пределах 4 угловых градусов [1].

Краткие характеристики трёх отечественных и двух зарубежных действующих ИСИ для термовакuumных испытаний КА приведены в табл. 1 [2].

Данные табл. 1 говорят о необходимости совершенствования характеристик вновь создаваемых отечественных ИСИ. Высокий уровень технического исполнения отечественных КА и введение новых стандартов также предполагают новые требования к точности испытательного оборудования. В частности, действующий с 2017 года ГОСТ Р МЭК 60904-9 [3], идентичный международному стандарту IEC 60904-9, делит ИСИ для фотоэлектрических приборов на три класса по каждому из трёх основных параметров (табл. 2).

Таблица 1

Сравнительные характеристики действующих ИСИ

	Источник излучения	Размеры освещаемой поверхности, м	Неравномерность энергетической освещенности, %	Максимальная удельная мощность, Вт/м ²
ИСИ ТБК-120	Ксеноновые лампы	2×2	< 10	1600
ИСИ ГВУ-600	Ксеноновые лампы	4×4	< 10	1600
ИС-500	Ксеноновые лампы	3×8	< 10	1500
ИСИ LSS	Ксеноновые лампы	6×5	0,5	2600
ИСИ SPF	Ксеноновые лампы	$D = 15$	1	4200

Одним из наиболее перспективных направлений в конструировании ИСИ для наземных условий АМ1,5 в настоящее время считается применение высокоэффективных светодиодов [4]. Светодиодные ИСИ, в сравнении с ИСИ на основе традиционных световых источников, обладают рядом преимуществ, которые наиболее полно могут быть раскрыты при использовании их в термовакuumных испытаниях, проводимых в ходе наземной отработки КА. Помимо большей

энергоэффективности, возможности регулировки в максимальных пределах мощности и спектра светового потока и лучших массогабаритных и эксплуатационных характеристик, главным преимуществом является возможность размещения светового источника светодиодного ИСИ непосредственно внутри термовакuumной камеры, в непосредственной близости к объекту испытаний [5]. Такое размещение позволяет наиболее просто реализовать ещё один, также считающийся

ся перспективным, принцип модульного построения, при котором трансформируемый ИСИ представляет набор отдельных блоков внутри термовакуумной камеры, скомпонованных исходя из требований к термовакуумной обработке конкрет-

ного КА [2; 6]. При этом следует особо отметить, что размещение светового источника светодиодного ИСИ в ограниченном пространстве требует от него как высокой эффективности, так и максимальной компактности.

Таблица 2

Классификация ИСИ, ГОСТ Р МЭК 60904-9-2016

Класс	Спектральное соотношение для всех диапазонов	Неравномерность энергетической освещенности, %	Временная нестабильность, %	
			Кратковременная	Долговременная
A	0,75 ... 1,25	2	0,5	2
B	0,6 ... 1,4	5	2	5
C	0,4 ... 2	10	10	10

1. Постановка задачи

Световой поток светодиодного ИСИ складывается из излучения множества отдельных групп светодиодов, образующих матрицу с распределенными параметрами. Исследования показывают, что для матрицы из отдельных точечных источников с широким углом распределения, которыми являются светодиоды, крайне трудно получить удельную мощность выше 1000 Вт/м² и приемлемую неравномерность светового потока одновременно [7]. В то же время уменьшение углов распределения повышает эффективность матрицы и позволяет при том же уровне освещенности обойтись меньшим количеством светодиодов. Поэтому в существующих светодиодных ИСИ для наземных условий АМ1,5 светодиодная матрица дополнительно оснащена оптической системой, занимающей большую часть объема светового источника. Следовательно, для адаптации светодиодного ИСИ к наземной обработке КА одной из главных задач является разработка высокоэффективной и, в то же время, максимально компактной оптической системы, суммирующей с минимальными потерями излучение множества светодиодов по спектру, углу и площади в единое световое поле.

Исходя из предполагаемой модульной конструкции ИСИ, а также из размерных ограничений свободного пространства существующих крупногабаритных термовакуумных камер, в частности, действующих в настоящее время в АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва» ТБК-120, КВУ-400 и ГВУ-600, размеры освещаемой одним светодиодным модулем площади приняты равными 320×320 мм, или 0,1 м². По этим же причинам, а также в связи с падением уровня освещенности при увеличении расстояния, практический интерес для

рассмотрения представляет расстояние от модуля до освещаемой площади в диапазоне 0,5–1 м.

2. Первичная оптическая система

Для получения узкоугольных световых распределений применяют первичные оптические элементы, специально оптимизированные для работы с различными типами светодиодов [8]. В большинстве случаев это оптические элементы с преломляющими или отражающими поверхностями, которые устанавливают непосредственно над излучающей поверхностью светодиода. Наиболее распространёнными конструкциями с малыми углами распределения и высокой световой эффективностью являются параболические рефлекторы (ПР) и TIR оптические элементы (англ. TIR – Total Internal Reflection), содержащие поверхности, работающие по принципу полного внутреннего отражения, а также подобные им элементы [9].

Параболические рефлекторы представляют зеркала параболической формы, фокусирующие световой поток. Преимуществом параболических рефлекторов считаются простота конструкции и, как правило, меньший размер по сравнению с TIR оптическими элементами. Главный недостаток параболических рефлекторов состоит в том, что они перенаправляют только боковые лучи. Поскольку ненаправленные центральные лучи имеют наивысшую интенсивность, это приводит к значительным потерям направленного светового потока.

TIR оптические элементы состоят из нескольких частей и содержат, как минимум, внутреннюю поверхность, через которую излучение поступает в оптический элемент, и боковую поверхность, работающую по принципу полного

внутреннего отражения и перенаправляющую боковые лучи. Теоретически характеристики TIR-оптических элементов лучше, поскольку они перенаправляют все лучи, в том числе центральные, что повышает световую эффективность. К недостаткам можно отнести большие размеры и сложность конструкции.

Расчёт поверхностей оптических элементов является сложной задачей. В случае точечного источника излучения её решение приводит к интегрированию системы дифференциальных уравнений первого порядка. В случае протяжённого источника излучения для расчёта оптических поверхностей используются различные оптимизационные методы, позволяющие подобрать их параметры и обеспечить наиболее точное формирование заданного распределения освещённости [10–12]. Для решения подобных задач существуют различные коммерческие программные продукты: LightTools, FRED, TracePro [13] и др. В частности, при помощи программного обеспечения FRED производителя Photon Engineering в [7] проведено моделирование в монохромном режиме светодиодного источника для ИСИ наземных условий AM1,5, результаты которого могут быть использованы для анализа характеристик светодиодного ИСИ для наземной обработки КА. Следует отметить, что сделанные при моделировании допущения позволяют оценить характеристики светового потока лишь в первом приближении. Для более точной оценки необходимо моделирование светодиодного источника во всём диапазоне длин волн с учётом соответствия мощности, спектральной точности и непараллельности светового потока условиям открытого космоса AM0.

2.1. Моделирование одиночных элементов

При формировании начальных условий одиночный светодиод принят как расходящийся источник света с излучающей поверхностью 1×1 мм, лучи которого генерируются в случайных направлениях в угловом диапазоне 120° . Размер

измеряемых участков равен 10×10 мм. Таким образом, на освещаемой площади 320×320 мм находится 1024 участка, что в 16 раз выше необходимого минимального разрешения [3]. В качестве первичных оптических элементов выбраны параболический рефлектор диаметром 18 мм и два TIR оптических элемента диаметром 13 и 27 мм с заявленными производителем углами распределения 6° .

Изначально в программной среде FRED смоделированы распределения световых потоков одиночных элементов – светодиодов без оптики и с установленной над ними различной первичной оптикой. В первом случае, из-за значительного уровня шума профили распределения освещённости дополнительно интерполированы при помощи простого и точного метода полиномиальной интерполяции, реализованного с использованием функций подгонки в пакете прикладных программ MATLAB.

Полученные интерполированные трёхмерные профили распределения освещённости одиночного светодиода и диагональные поперечные сечения профилей для расстояний 0,5 и 1 м показаны на рис. 1 и 2.

На рис. 3 сравниваются диагональные сечения профилей распределения освещённости одиночных элементов с установленными 18 мм параболическим рефлектором, 13 мм и 27 мм TIR оптическими элементами на расстояниях 0,5 и 1 м.

Из результатов видно, что все представленные оптические элементы обладают высокими коллимирующими свойствами. 27 мм TIR оптический элемент обладает наибольшей эффективностью, а 18 мм параболический рефлектор – наименьшей. Однако в первом случае на расстоянии 0,5 м наблюдается провал в центре профиля характеристики направленности, вызванный сферической абберацией (рис. 4). Поперечная сферическая абберация определяется расстоянием между осью и наиболее расходящимся лучом [14] и в данном случае приводит к тому, что уровень освещённо-

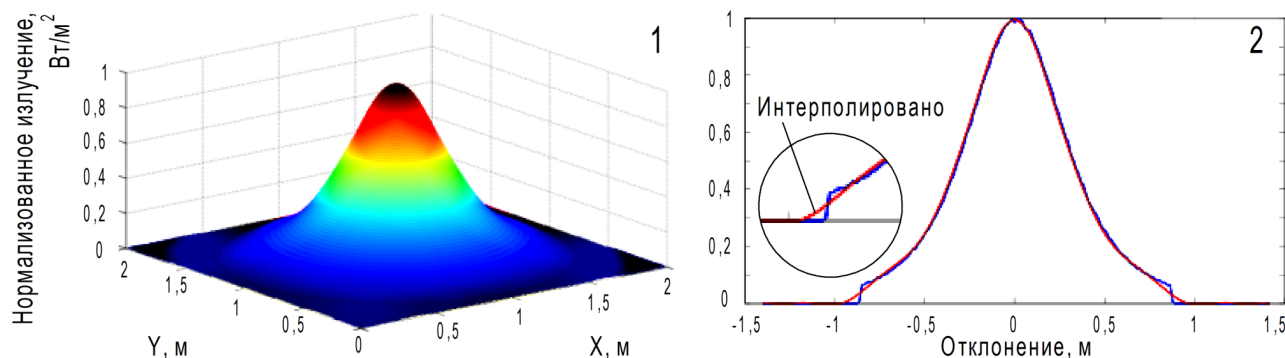


Рис. 1. Нормализованные интерполированный трёхмерный профиль распределения освещённости (1) и диагональное поперечное сечение профиля (2) одиночного светодиода на расстоянии 0,5 м

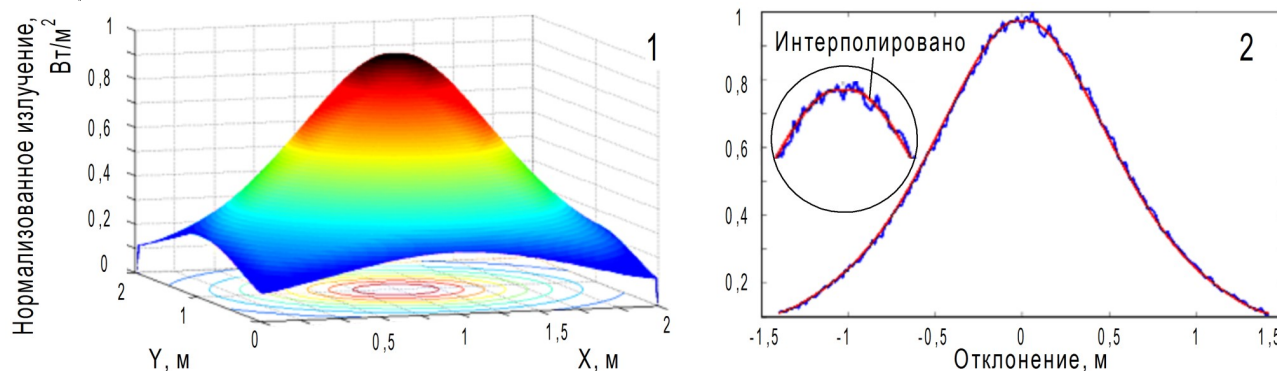


Рис. 2. Нормализованные интерполированный трёхмерный профиль распределения освещённости (1) и диагональное поперечное сечение профиля (2) одиночного светодиода на расстоянии 1 м

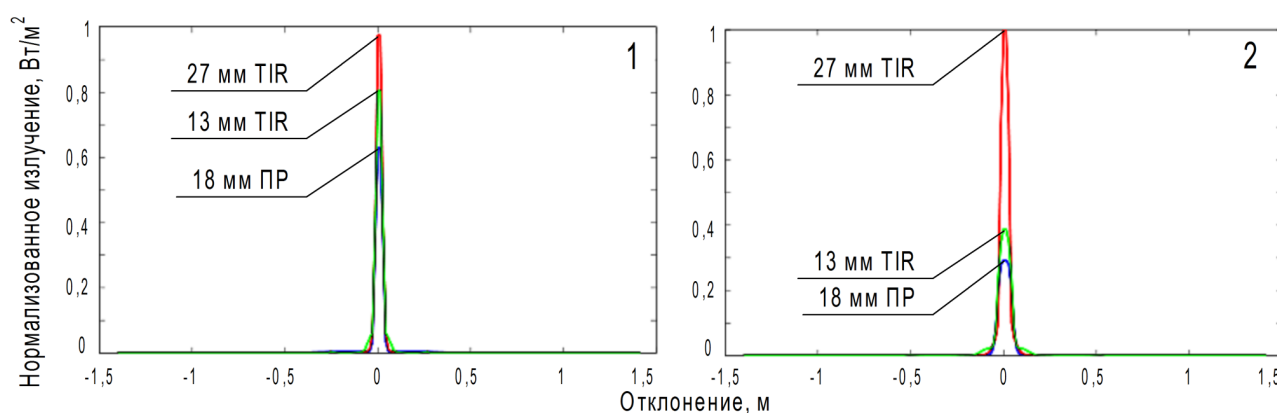


Рис. 3. Диагональные поперечные сечения профилей распределения освещённости различных оптических элементов, нормализованные к наибольшему значению, на расстояниях 0,5 м (1) и 1 м (2)

сти будет несколько ниже ожидаемого, поскольку наибольшие значения соответствуют боковым пикам.

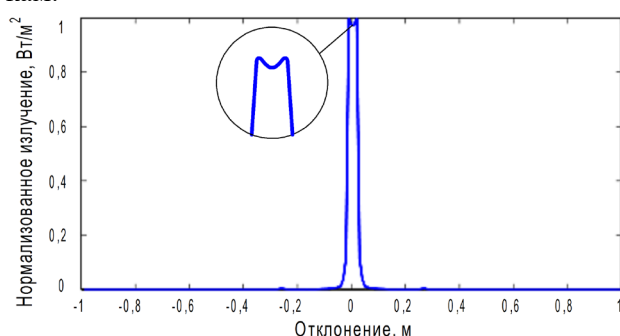


Рис. 4. Поперечное сечение профиля распределения освещённости одиночного светодиода с 27 мм TIR на расстоянии 0,5 м

2.2. Моделирование первичной оптической системы

На основе полученных моделей одиночных элементов далее смоделированы распределения световых потоков нескольких вариантов светодиодного источника с различными видами и количествами первичных оптических элементов.

Максимальное количество оптических элементов в светодиодной матрице физически ограничено и зависит от их размеров, взаимной компоновки и углов распределения. Оптимальный вариант представляет собой компромисс между межэлементными расстояниями, размерами и углами распределения светового потока оптических элементов. В любом случае, при расстоянии от светового источника до освещаемой площади более 1 м освещённость падает настолько, что получить необходимый уровень освещённости становится достаточно сложно.

Значения удельной мощности и неравномерности излучения различных моделей сведены в табл. 3; наиболее характерные случаи проиллюстрированы на рис. 10–13.

На рис. 5 представлены трёхмерные интерполированные профили распределения освещённости модели с равномерно размещёнными в матрице 2475 светодиодами без оптических элементов на расстояниях 0,5 м и 1 м.

Полученная на расстоянии 0,5 м освещённость, равная 3654 Вт/м^2 , значительно превышает требуемый уровень, но неравномерность, состав-

ляющая 10,45 %, неудовлетворительна. На расстоянии 1 м неравномерность улучшается до 2,74 %, но освещённость находится ниже требуемого уровня в пределах 1000 Вт/м².

На рис. 6 представлены трёхмерные профили распределения освещённости модели с 612 параболическими рефлекторами диаметром 18 мм на расстояниях 0,5 и 1 м.

Таблица 3

Удельная выходная мощность и неравномерность излучения для различных оптических оформлений

Оптические элементы	Количество элементов	Расстояние	P, Вт/м ²	Неравномерность		Рисунок
				%	Класс по [3]	
Нет	2475	0,5	3654	10,45		5 (1)
	2475	1	1015	2,75		1 (2)
	2997	0,5	4408	11,02		
	2997	1	1227	2,92		
	3570	0,5	5248	10,43		
	3570	1	1462	2,77	B	
18 мм ПР	390	0,5	1398	4,40	B	
	390	1	1020	10,10		
	517	0,5	1541	3,49	B	
	517	1	1093	1,56		
	612	0,5	1637	3,43	B	6 (1)
	612	1	1130	0,83		6 (2)
	885	0,5	1882	3,36	B	
	885	1	1225	0,85		
27 мм TIR	189	0,5	671	20,03		
	189	1	629	8,52		
	248	0,5	671	20,03		
	248	1	629	8,52		
	390	0,5	702	19,13		7 (1)
	390	1	663	2,99		7 (2)
	612	0,5	710	19,00		
	612	1	672	2,73		
	885	0,5	722	18,24		
	885	1	685	2,89		
13 мм TIR	390	0,5	1916	74,76		
	390	1	1694	60,61		
	612	0,5	2527	23,80		
	612	1	2224	28,17		
	715	0,5	2651	7,58	C	
	715	1	2366	14,42		
	885	0,5	2727	2,72	B	
	885	1	2482	6,42	C	
	945	0,5	2741	2,58	B	
	945	1	2505	5,78	C	
	1207	0,5	2786	1,88	A	8 (1)
	1207	1	2576	3,35	B	8 (2)

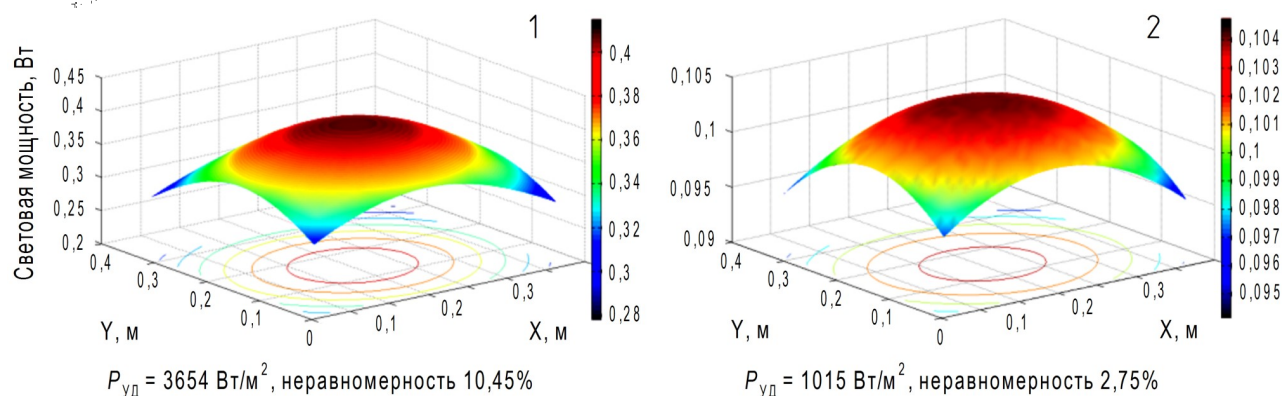


Рис. 5. Трёхмерные интерполированные профили распределения освещённости 2475 светодиодов без оптических элементов на расстояниях 0,5 м (1) и 1 м (2)

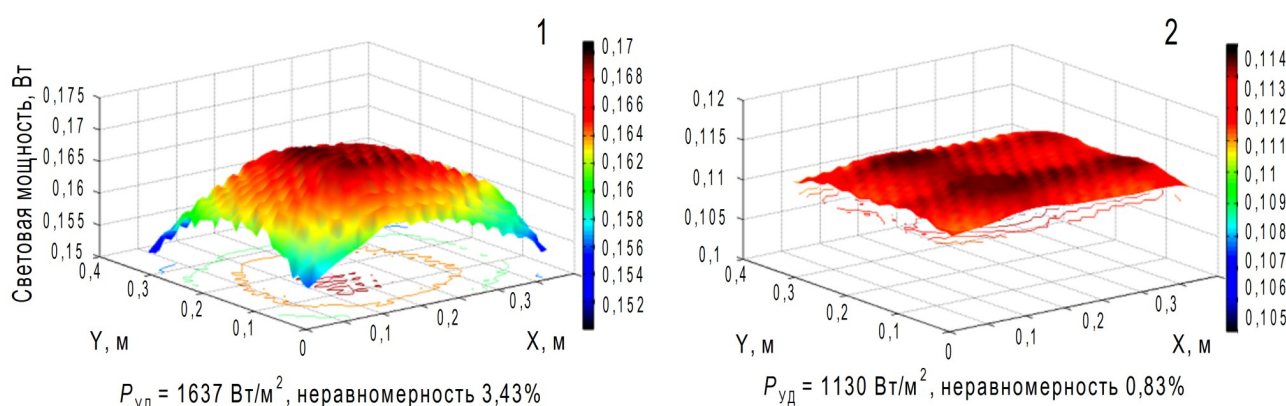


Рис. 6. Трёхмерные профили распределения освещённости 612 светодиодов с 18 мм параболическими рефлекторами на расстоянии 0,5 м (1) и 1 м (2)

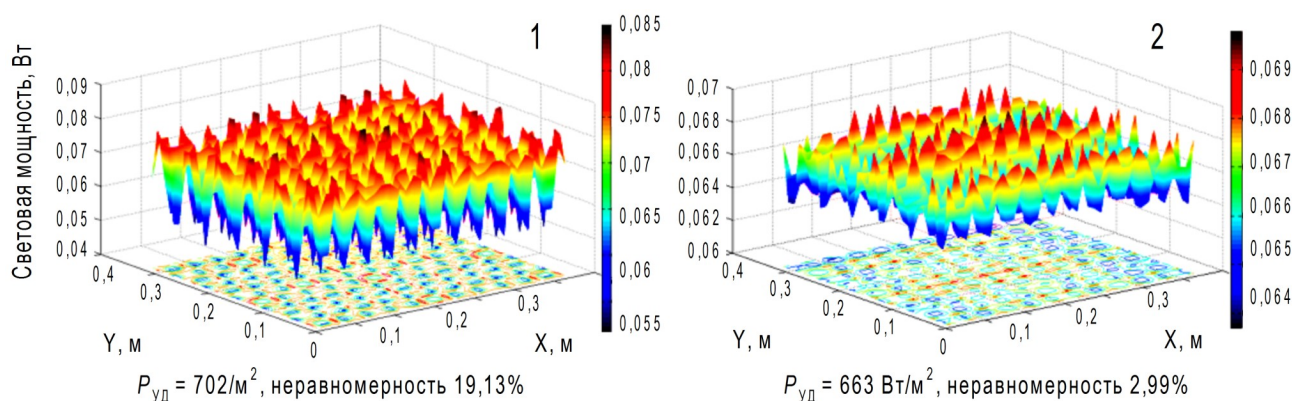


Рис. 7. Трёхмерные профили распределения освещённости 390 светодиодов с 27 мм TIR оптическими элементами на расстояниях 0,5 м (1) и 1 м (2)

На рис. 7 представлены трёхмерные профили распределения освещённости модели с 390 TIR оптическими элементами диаметром 27 мм на расстояниях 0,5 и 1 м.

Невысокий уровень освещённости можно объяснить как недостаточным количеством TIR оптических элементов, так и их слишком большим размером, поскольку расходящиеся лучи элементов, расположенных на краях матрицы, лишь частично попадают на освещаемую площадь.

На рис. 8 представлены трёхмерные профили распределения освещённости модели с 1207 TIR оптическими элементами диаметром 13 мм на расстояниях 0,5 и 1 м.

При одинаковом количестве оптических элементов световая эффективность модели на основе TIR оптических элементов малого размера значительно выше. Можно предположить, что дальнейшее уменьшение угла распределения TIR оптических элементов с 6 до 4 градусов в соответствии

с предъявляемыми требованиями по непараллельности светового потока к ИСИ для условий АМО и, как следствие, уменьшение размеров элементов дополнительно повысит эффективность светового источника.

Неравномерность светового потока может быть дополнительно уменьшена при использовании оптических элементов, формирующих световые распределения не круглой, а прямоугольной формы. Метод компьютерного моделирования внутренней поверхности компактного TIR опти-

ческого элемента, формирующего однородное узкоугольное распределение любой формы, в том числе прямоугольной, подробно описан в [11].

Следует учитывать, что проявившаяся в одной из моделей сферическая aberrация при получении полного спектра может привести к неточному сложению световых потоков от светодиодов с разными длинами волн.

Для дальнейшего повышения характеристик светового потока светодиодного источника ИСИ необходимо применение вторичной оптики [15].

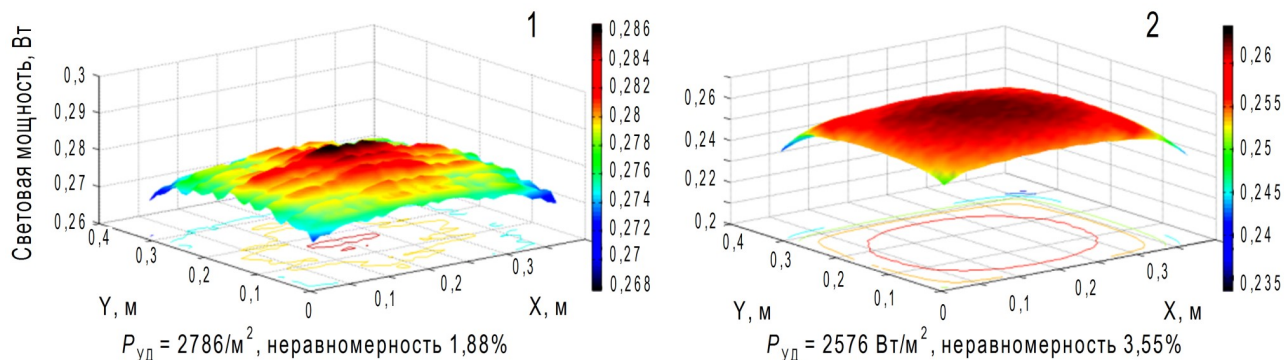


Рис. 8. Трёхмерные профили распределения освещённости 1207 светодиодов с 13 мм TIR оптическими элементами на расстояниях 0,5 м (1) и 1 м (2)

3. Вторичная оптическая система

Сравнительный анализ существующих видов вторичной оптики, пригодной для формирования выходного излучения светодиодного ИСИ, показывает, что наиболее оптимальный вариант представляют лучевые гомогенизаторы [7].

Существуют два основных типа гомогенизаторов: неизображающие и изображающие [16].

Неизображающие гомогенизаторы (рис. 9) состоят из преломляющего микролинзового раstra и сферической линзы. Микролинзовый растр M_1 разделяет входной световой поток на отдельные элементарные лучи, а сферическая линза O_1 суммирует их на плоскости.

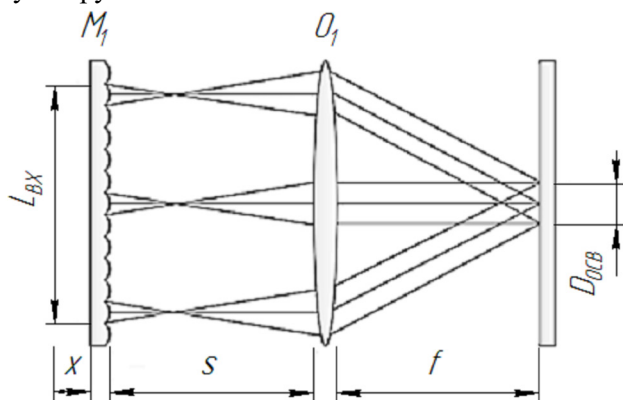


Рис. 9. Неизображающий гомогенизатор: M_1 – микролинзовый растр, O_1 – сферическая линза

Изображающие гомогенизаторы (рис. 10) состоят из двух идентичных микролинзовых растров M_1, M_2 и сферической линзы O_1 .

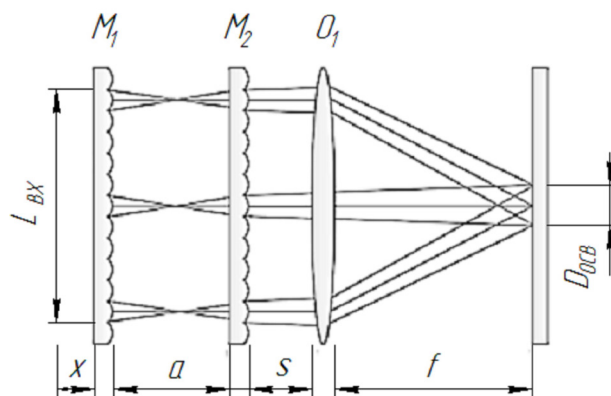


Рис. 10. Изображающий гомогенизатор: M_1, M_2 – микролинзовые растры, O_1 – сферическая линза

Как неизображающий, так и изображающий гомогенизаторы могут использоваться для освещения площадей с высокой однородностью. Неизображающие гомогенизаторы в основном используются в конструкциях с большой площадью освещаемой поверхности и малыми числовыми апертурами. Они дешевле, легче в настройке, из-за использования меньшего количества оптических поверхностей происходит меньше оптических потерь. С другой стороны, они чувствительны к дифракционным эффектам, а угол расходимости входного

луча значительно влияет на качество плоского участка характеристики распределения освещённости.

Изображающие гомогенизаторы больше подходят для конструкций, требующих высокой однородности, поскольку получаемое качество плоского участка профиля распределения освещённости в этом случае выше и не так критично к углу расхождения входного луча. Размер освещаемой области можно дополнительно варьировать, изменяя расстояние между двумя микролинзовыми растрами. С другой стороны, они дороже, сложнее в настройке, а оптические потери выше из-за использования большего количества оптических поверхностей.

Исследования в этой области [7] показали, что изображающие гомогенизаторы больше подходят для применения в светодиодном ИСИ, главным образом, по причине высокой чувствительности неизображающих гомогенизаторов к углу расхождения первичной оптики. На рис. 11 хорошо заметна разница в равномерности распределения освещённости двух математических моделей одиночного светодиода, оснащённого первичной оптикой в виде шестиградусного TIR оптического элемента и вторичной оптикой в виде неизображающего и изображающего гомогенизаторов.

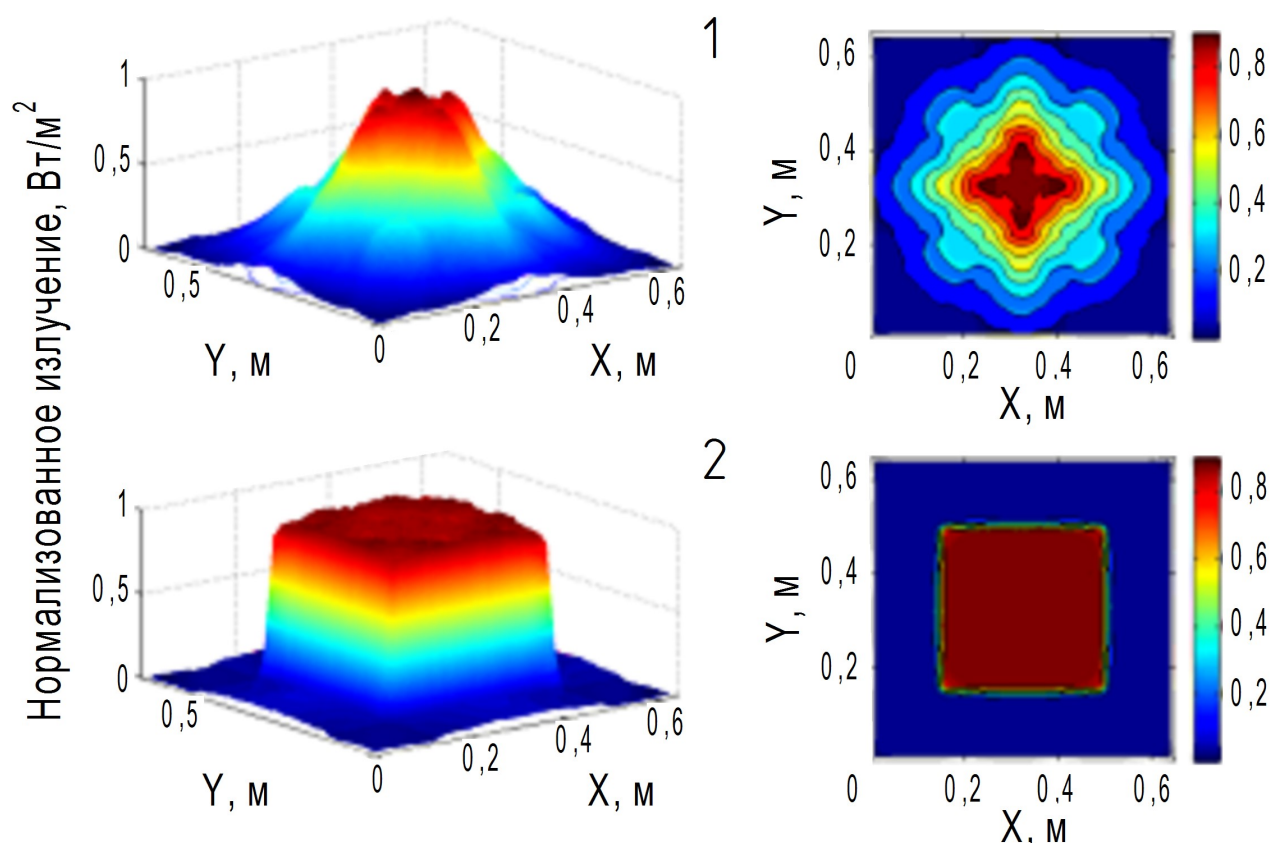


Рис. 11. Нормализованное выходное излучение одиночного светодиода: первичная оптика – шестиградусный TIR оптический элемент, вторичная оптика – неизображающий (1) или изображающий (2) гомогенизатор

3.1. Моделирование вторичной оптической системы

Как оптимальный вариант, далее рассмотрен изображающий гомогенизатор на основе микролинзовых растров из квадратных выпуклых микролинз. Для исключения сферических aberrаций выбраны асферические микролинзы. Центральная длина волны излучения монохромных светодиодов 590 нм, её полная ширина при половинном максимуме – 20 нм. Значение световой мощности для всех светодиодов принято равным 1 Вт.

Допущения, что все светодиоды идентичны и монохромны, достаточно, чтобы доказать необходимость и эффективность вторичной оптики.

Однако оно не позволяет оценить хроматические aberrации, которые могут возникнуть в результате сложения излучения светодиодов с разными длинами волн. Кроме этого, предполагается, что все светодиоды имеют одинаковую мощность излучения. Однако некоторые из светодиодов с различными длинами волн могут иметь меньшую выходную мощность, особенно в областях, близких к границам заданного диапазона, что приведёт к некоторому снижению общей световой эффективности.

Расстояние между сферической линзой и областью освещения f равно фокусному расстоянию сферической линзы f_{ol} . Оба микролинзовых массива идентичны.

В ходе моделирования определены оптимальные расстояния между различными элементами: расстояние между светодиодной матрицей и первым микролинзовым массивом матриц x , расстояние между первым и вторым микролинзовым массивом a и расстояние между вторым микролинзовым массивом и сферической линзой s . Результаты приведены в табл. 4. Видно, что суммарное расстояние между всеми элементами вторичной оптики составит примерно 70 мм, что

приведёт к незначительному увеличению соответствующего габаритного размера оптической системы светодиодного модуля.

Неоднородность светового потока модели с 612 светодиодами на освещаемой площади 320×320 мм составила 0,29 %. Удельная мощность светового потока достигает 1316 Вт/м^2 , что вплотную приближается к требуемому значению $1340\text{--}1440 \text{ Вт/м}^2$.

Результат моделирования показан на рис. 12.

Таблица 4

Оптимальные значения расстояний a, s, x

Параметр	Обозначение	Значение, мм
Шаг микролинзовых массивов	p	2,5
Фокусное расстояние микролинзовых массивов	f_M	14,2
Фокусное расстояние линзы O_I	f_{OI}	2000
Расстояние источник – M_I	x	20
Расстояние $M_I - M_2$	a	14,2
Расстояние $M_2 - O_I$	s	14,2
Расстояние $O_I - D_{OCB}$	f	2000

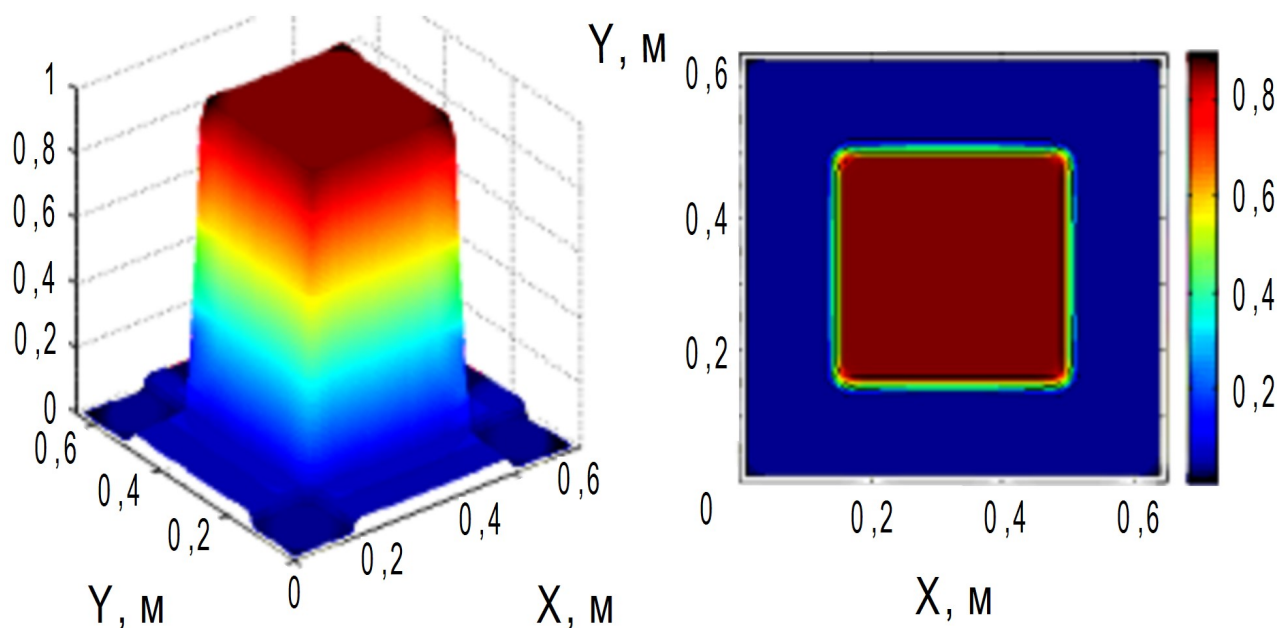


Рис. 12. Нормализованный профиль распределения освещённости 612 светодиодов с шестиградусными TIR в качестве первичной оптики и изображающим гомогенизатором в качестве вторичной оптики

Заключение

Результаты показывают, что основные характеристики смоделированного светодиодного источника имитатора солнечного излучения не уступают или вплотную приближаются к анало-

гичным характеристикам, предъявляемым к имитаторам солнечного излучения для наземной отработки космических аппаратов.

Для получения необходимого уровня освещённости требуется неоправданно большое количество светодиодов без первичной оптики,

при этом из-за значительного рассеивания крайне трудно получить приемлемую эффективность, направленность и однородность светового потока одновременно. В то же время при использовании первичных оптических элементов аналогичные характеристики достигаются с намного меньшим количеством светодиодов. Следовательно, светодиодный источник имитатора солнечного излучения обязательно должен иметь первичную оптику.

Результаты моделирования показывают, что только модели с TIR оптическими элементами малого размера обеспечивают необходимые характеристики при расстоянии от светового источника до освещаемой площади в пределах 1 м, в частности, неравномерность светового потока, соответствующую требованиям класса С по ГОСТ Р МЭК 60904-9. Размеры первичной оптической системы, состоящей из оптических элементов малого размера, позволяют объединить её со светодиодной матрицей в компактный модуль с минимальными габаритами.

При этом следует отметить, что TIR оптические элементы в силу их некоторых свойств могут

недостаточно точно суммировать световые потоки от светодиодов с разными длинами волн, используемых для получения полного спектра.

Более высокие значения основных характеристик светового потока могут быть получены при совместном применении первичной и вторичной оптики. Самые высокие показатели возможны при использовании в качестве вторичной оптики изображающего гомогенизатора. В этом случае неравномерность светового потока может превосходить требования высшего класса А по ГОСТ Р МЭК 60904-9, а расстояние до освещаемой площади – увеличено до 2 м. Однако применение вторичной оптики приведёт к некоторому увеличению массогабаритных показателей и снижению эффективности светового источника имитатора солнечного излучения.

Исходя из размеров световых полей действующих ИСИ (табл. 1), можно определить общее число смоделированных светодиодных модулей площадью 0,1 м²: для ИСИ, аналогичного ИСИ ТБК-120 – не менее 40 шт.; для ИСИ, аналогичного ИСИ ГВУ-600 – не менее 160 шт.

Список литературы

- [1] Крат С. А., Христич В. В. Тепловакуумная обработка КА: развитие современных тенденций // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 4 (30). С. 126–129.
- [2] Асланян Р. О., Анисимов Д. И., Марченко И. А., Пантелеев В. И. Имитаторы солнечного излучения для термовакуумных испытаний космического аппарата // Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18. № 2. С. 323–327.
- [3] ГОСТ Р МЭК 60904-9-2016. Приборы фотоэлектрические. Часть 9. Требования к характеристикам имитаторов солнечного излучения. М.: Стандартинформ, 2017. 12 с.
- [4] Reynolds K. LED-based sun-simulator design: technical and commercial considerations // Photonics Spectra, March 2015. pp. 54–58.
- [5] Двирный Г. В., Шевчук А. А., Двирный В. В., Елфимова М. В., Крушенко Г. Г. Анализ возможности создания имитатора солнечного излучения на основе светодиодных источников для наземной обработки космических аппаратов // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19. № 2. С. 271–280.
- [6] Асланян Р. О., Марченко И. А., Анисимов Д. И. и др. Разработка компактных источников излучения солнечного спектра // Материалы XX Междунар. науч. конференции «Решетневские чтения» / АО «ИСС» им. акад. М. Ф. Решетнёва. Красноярск, 2016. С. 436–437.
- [7] Plita F. Optical design of a fully LED-based solar simulator. PhD thesis. Loughborough, Loughborough University, July 2015. 186 p.
- [8] Байнева И. И., Байнев В. В. Оптические системы для светодиодов // Фотоника. 2016. № 2. С. 84–93.
- [9] Chen J.-J., Wang T.-Y., Huang K.-L., Liu T.-S., Tsai M.-D., Lin C.-T. Freeform lens design for LED illumination // Optics Express, May, 2012, vol. 20, no. 10, pp. 10984–10995.
- [10] Моисеев М. А., Борисова К. В., Бызов Е. В., Досколович Л. Л. Оптимизационный метод для расчета TIR оптических элементов, включающий процедуру быстрой трассировки лучей // Компьютерная оптика. 2013. Т. 37. № 1. С. 51–58.
- [11] Андреева К. В., Моисеев М. А., Кравченко С. В., Досколович Л. Л. Метод расчета оптических элементов с поверхностью свободной формы, работающих по принципу полного внутреннего отражения // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40. № 4. С. 467–474.
- [12] Досколович Л. Л., Борисова К. В., Моисеев М. А. Расчет зеркала для формирования заданного непрерывного распределения освещенности на основе метода согласованных квадрик // Компьютерная оптика. 2015. Т. 39. № 3. С. 347–356.
- [13] Байнева И. И. Моделирование световых приборов в программном комплексе TRACEPRO // Материалы XIII Всеросс. науч.-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики» / АУ «Технопарк Мордовия». 2017. С. 202–208.

- [14] Hecht E. Optics (5th Edition). Harlow, Pearson Education, 2017. 729 p.
- [15] Vu N. H., Pham T. T., Shin S. LED uniform illumination using double linear fresnel lenses for energy saving // Energies, 2017, no. 10 (12), 2017. pp. 1–15. doi:10.3390/en10122091
- [16] Dickey F. M., Holswade S. C., Shealy D. L. Laser Beam Shaping Applications. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2005. 376 c.

OPTICAL SYSTEM OF PERSPECTIVE LED-BASED SOLAR SIMULATOR FOR SPACECRAFT GROUND TESTING APPLICATIONS

A. A. Shevchuk^{1,2}, G. V. Dvirniy³, G. G. Krushenko⁴,
V. V. Dvirniy^{1,2}, M. V. Elfimova⁵

¹JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems,
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation

²Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

³Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation

⁴Institute of Computational Modelling SB RAS, FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russian Federation

⁵Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia,
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation

The transition to the production of new generation spacecraft requires a significant improvement in the methods and means of ground experimental testing, improving the accuracy of test equipment. One of the basic and most complex elements of the test equipment used in complex thermal vacuum testing of spacecraft is the solar simulator. Currently, a promising direction is the construction of solar simulators based on highly efficient LEDs that have significant advantages over traditional sources. Design of a highly efficient and at the same time compact optical system summing the emission of many individual LEDs of the LED array over the spectrum, angle and area into a uniform light field with minimal losses is the one of base tasks in development of adapted for ground testing spacecraft solar simulator. The article analyzes the mathematical modeling results of LED solar simulator's light source on the example of several models with different numbers of LEDs, both without optical elements, and with various primary optical elements. Results it follows that the LED solar simulator radiation must necessarily have, at a minimum, a primary optical system. The influence of the number, type and size of the primary optical elements in the matrix on the characteristics of the light flux is determined. The combined use of primary and secondary optical systems leads to a further light characteristics improvement of the LED solar simulator, but at the cost of some reduction in overall efficiency. In general, the characteristics of the modeled light source correspond or closely approach to required ones, which indicates that it is possible in principle to create a solar simulator based on LED sources for ground testing of spacecraft.

Keywords: spacecraft, ground testing, thermal vacuum testing, solar simulator, optical system, light emitting diode.

References

- [1] Krat S. A., Hristich V. V. *Teplovakuumnaya otrabotka KA: razvitie sovremennykh tendentsiy* [Spacecraft thermal vacuum optimization: development of new tendencies] // Vestnik SibGAU, 2010, no. 4, pp. 126–129. (In Russian)
- [2] Aslanyan R. O., Anisimov D. I., Marchenko I. A., Panteleev V. I. *Imitatory solnechnogo izlucheniya dlya termovakuumnykh ispytaniy kosmicheskogo apparata* [Solar simulators for thermal vacuum tests of spacecraft] // Siberian Journal of Science and Technology, 2017, vol. 18, no. 2, pp. 323–327. (In Russian)
- [3] GOST R MEK 60904–9–2016. *Pribory fotoelektricheskie. Chast' 9. Trebovaniya k harakteristikam imitatorov solnechnogo izlucheniya* [State Standard R IEC 60904–9–2016. Photovoltaic devices. Part 9. Solar simulator performance requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2017, 12 p. (In Russian)
- [4] Reynolds K. LED-based sun-simulator design: technical and commercial considerations // Photonics Spectra, March 2015, pp. 54–58.
- [5] Dvirniy G. V., Shevchuk A. A., Dvirniy V. V., Elfimova M. V., Krushenko G. G. *Analiz vozmozhnosti sozdaniya imitatora solnechnogo izlucheniya na osnove svetodiodnykh istochnikov dlya nazemnoj otrabotki kosmicheskikh apparatov* [Analysis of LED-based solar simulator development capability for spacecraft ground testing application]. Siberian Journal of Science and Technology, 2018, vol. 19, no. 2, pp. 271–280. (In Russian)

- [6] Aslanyan R. O., Marchenko I. A., Anisimov D. I. *Razrabotka kompaktnykh istochnikov izlucheniya solnechnogo spektra* [Designing small-sized solar spectrum thermal radiation sources]. *Materialy XX Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Reshetnevskie chteniya»* [Materials of the XX International Scientific Conference «Reshetnev Readings»]. JSC ISS-Reshetnev. Krasnoyarsk, 2016, pp. 436–437. (In Russian)
- [7] Plita F. Optical design of a fully LED-based solar simulator. PhD thesis. Loughborough, Loughborough University, July 2015. 186 p.
- [8] Bayneva I. I., Baynev V. V. *Opticheskie sistemy dlya svetodiodov* [Optical systems for light-emitting diodes] // *Photonics*, 2016, no. 2, pp. 84–93. (In Russian)
- [9] Chen J.-J., Wang T.-Y., Huang K.-L., Liu T.-S., Tsai M.-D., Lin C.-T. Freeform lens design for LED illumination // *Optics Express*, May, 2012, vol. 20, no. 10, pp. 10984–10995.
- [10] Moiseyev M. A., Borisova K. V., Byzov E. V., Doskolovich L. L. *Optimizacionnyj metod dlya rascheta TIR opticheskikh ehlementov, vklyuchayushchij proceduru bystroj trassirovki lucej* [Optimization method for computation of TIR optical elements based on quick raytracing procedure] // *Computer optics*, 2013, vol. 37, no. 1, pp. 51–58. (In Russian)
- [11] Andreeva K. V., Moiseev M. A., Kravchenko S. V., Doskolovich L. L. *Metod rascheta opticheskikh ehlementov s poverhnost'yu svobodnoj formy, rabotayushchih po principu polnogo vnutrennego otrazheniya* [Design of optical elements with TIR free-form surface] // *Computer optics*, 2016, vol. 40, no. 4, pp. 467–474. (In Russian)
- [12] Doskolovich L. L., Borisova K. V., Moiseyev M. A. *Raschet zerkala dlya formirovaniya zadannogo nepreryvnogo raspredeleniya osveshchennosti na osnove metoda soglasovannykh kvadrik* [Design of a mirror for generating a prescribed continuous illuminance distribution based on the supporting quadric method]. *Computer optics*, 2015, vol. 39, no. 3, pp. 347–356. (In Russian)
- [13] Bayneva I. I. *Modelirovanie svetovykh priborov v programmnom komplekse TRACEPRO* [Modelling of light devices in the program complex TRACEPRO]. *Materialy XIII Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Problemy i perspektivy razvitiya otechestvennoj svetotekhniki, ehlektrotekhniki i ehnergetiki»* [Materials XIII All-Russian Scientific Conference «Problems and perspectives of the development of domestic lightings, electronics and energy»]. AU «Tekhnopark Mordoviya». Saransk, 2017, pp. 202–208. (In Russian).
- [14] Hecht E. *Optics* (5th Edition). Harlow, Pearson Education, 2017. 729 p.
- [15] Vu N. H., Pham T. T., Shin S. LED uniform illumination using double linear fresnel lenses for energy saving // *Energies*, 2017, no. 10 (12), 2017, pp. 1–15. doi:10.3390/en10122091
- [16] Dickey F. M., Holswade S. C., Shealy D. L. *Laser Beam Shaping Applications*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2005. 376 p.

ПРОБЛЕМЫ УНИФИКАЦИИ МНОГОКАНАЛЬНОГО ИНТЕРФЕЙСНОГО МОДУЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУР ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. И. Горностаев

*АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва»,
г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация*

Важным этапом разработки унифицированного многоканального интерфейсного модуля контроля температур, входящего в состав измерительных приборов и осуществляющего контроль температуры на элементах конструкции космических аппаратов, является анализ предъявляемых технических требований к измерительным приборам и условий их эксплуатации, которые могут повлиять на структуру модуля.

Статья посвящена анализу общих требований к измерительным приборам космических аппаратов, строящимся по магистрально-модульному принципу на базе центрального приборного модуля и содержащим в своём составе интерфейсный модуль контроля температур, а также анализу технических характеристик подключаемых к измерительным приборам различного типа первичных преобразователей.

Показано, что к интерфейсным модулям контроля температур, имеющим каналы контроля с различными диапазонами измерения, предъявляются различные требования по точности и стабильности измерения температуры, а в качестве первичных преобразователей для контроля температуры наиболее часто используют термопреобразователи сопротивления с медными и платиновыми чувствительными элементами с номинальными сопротивлениями 100 и 500 Ом. При невысоких требованиях к точности и стабильности измерения используют 100-омные термопреобразователи, при повышенных требованиях к точности и стабильности измерения – 500-омные термопреобразователи. Если не требуется высокое быстродействие измерения температуры, то используют термопреобразователи сопротивления с медными чувствительными элементами. Если необходимы высокое быстродействие и повышенная стабильность измерения, то используют термопреобразователи сопротивления с платиновыми чувствительными элементами.

Ключевые слова: космический аппарат, контроль температуры, точность и стабильность измерения, измерительный прибор, первичный преобразователь, термопреобразователь сопротивления.

Введение

Многоканальный интерфейсный модуль контроля температур (ИМКТ) является составной частью измерительных приборов, используемых для контроля температуры на элементах конструкции космических аппаратов (КА), в основу которых положен магистрально-модульный принцип построения на базе центрального приборного модуля (ЦПМ) [1].

При проектировании многоканального ИМКТ по требованиям, предъявляемым к измери-

тельным приборам, особое внимание уделяют его структурной унификации, которая бы позволила оптимально решить задачи обеспечения требуемой точности и стабильности измерения температуры в различных диапазонах для измерительной системы в целом [2; 3]. При этом учитывают, что оптимальность решения поставленных задач будет зависеть:

- от выбора устанавливаемых на элементы конструкции КА датчиков температуры (ДТ), которые по отношению к измерительному прибору являются первичными преобразователями и вносят собственную составляющую погрешности измерения;
- от выбора способов подключения соединительных проводов (линий связи) первичных

✉ galiv@iss-reshetnev.ru

© Горностаев А. И., 2019

преобразователей к входным цепям каналов контроля ИМКТ, которые используются для компенсации составляющей погрешности измерения, вносимой сопротивлениями соединительных проводов;

- от выбора методов измерения, которые используются для минимизации методической составляющей погрешности измерения, возникающей в самом измерительном приборе;
- от выбора способов защиты от воздействия на входные цепи каналов контроля ИМКТ помех, которые используются для повышения стабильности результатов измерения.

При определении структуры унифицированного ИМКТ также учитывают требуемое количество каналов контроля, требуемый для каждого канала контроля диапазон измерения температуры, различия технических характеристик подключаемых к входным цепям каналов контроля первичных преобразователей, а также параметры воздействующих на входные цепи синфазных и дифференциальных помех в процессе испытаний и при штатной эксплуатации измерительного прибора.

Для достижения оптимальных результатов в решении поставленных задач сначала проводят сравнительный анализ различных способов уменьшения составляющих общей погрешности измерения, вносимых в измерительной системе первичными преобразователями, линиями связи и измерительным прибором, а затем на основе проведённого анализа определяют структуру унифицированного многоканального ИМКТ.

Наилучшие результаты при решении поставленных задач могут быть достигнуты в том случае, если в структуре унифицированного ИМКТ будут предусмотрены специальные аппаратные средства компенсации систематической и случайной составляющих погрешности измерения, а в специальном программном обеспечении (СПО) ЦПМ предусмотрены алгоритмы проведения автокалибровок результатов измерения.

В данной статье проведён анализ общих требований, предъявляемых к измерительным приборам, и основных технических характеристик первичных преобразователей, используемых для контроля температур на элементах конструкции КА, которые могут повлиять на структуру унифицированного ИМКТ.

Общие требования к измерительным приборам

Измерительные приборы, используемые для измерения температуры на элементах конструкции КА, являются вторичными преобразователями, обеспечивающими преобразование аналоговых сигналов первичных преобразовате-

лей в цифровые, и содержат в своём составе многоканальный ИМКТ и ЦПМ (рис. 1).

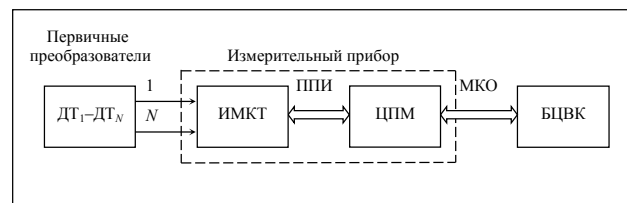


Рис. 1. Функциональная блок-схема измерительной системы

К измерительным приборам предъявляются требования по точности и стабильности измерения в условиях эксплуатации КА в диапазоне температур от -10°C до $+40^{\circ}\text{C}$. При этом для каналов контроля ИМКТ рабочие диапазоны измерения температур задаются индивидуально и находятся внутри указанного диапазона. В случае необходимости прецизионной термостабилизации отдельных элементов конструкции КА рабочие диапазоны измерения могут быть заданы очень узкими [4–6].

Первичные преобразователи $\text{ДТ}_1\text{--}\text{ДТ}_N$ (N – число каналов контроля в измерительной системе), устанавливаемые на элементы конструкции КА и подключаемые через линии связи бортовой кабельной сети к измерительному прибору, позволяют измерять температуру в более широком диапазоне, в котором необходимо учитывать нелинейность характеристик преобразования. Однако, в указанном эксплуатационном диапазоне температур эти характеристики в большинстве случаев считают приближенно линейными, поэтому к измерительным приборам, как правило, для повышения точности измерения не предъявляются специальные требования по линеаризации контролируемых аналоговых сигналов первичных преобразователей.

Точность и стабильность измерения входных сигналов первичных преобразователей $\text{ДТ}_1\text{--}\text{ДТ}_N$ будет меняться вместе с колебаниями температуры окружающей среды измерительного прибора. Поэтому в отдельных случаях, когда требуется повышенная точность и стабильность измерения температуры, могут предъявляться требования по установке измерительного прибора в составе КА на специальную термостабилизирующую плиту, обеспечивающую более узкий эксплуатационный диапазон температур, в котором будут гарантироваться его метрологические характеристики.

К конструкции измерительных приборов предъявляются требования по обеспечению высокой степени стойкости к электромагнитным помехам, электростатическим разрядам и радиочастотным помехам.

К многоканальному ИМКТ предъявляются требования к линейному преобразованию кон-

тролируемых аналоговых сигналов первичных преобразователей $ДТ_1$ – $ДТ_N$ в цифровые в заданных рабочих диапазонах измерения и с заданной разрешающей способностью, а также к формированию пакета цифровых данных о результатах преобразования аналоговых сигналов и их передачи в ЦПМ с требуемой периодичностью для дальнейшей обработки. Для всех каналов контроля ИМКТ указываются основные технические характеристики первичных преобразователей, граничные значения параметров линий связи бортовой кабельной сети, а также параметры воздействующих синфазных и дифференциальных помех, при которых должна обеспечиваться требуемая для измерительного прибора точность и стабильность измерения температуры. В отдельных случаях предъявляются специальные требования к аппаратным средствам формирования эталонных (калибровочных) сигналов, необходимых для проведения автокалибровок результатов измерения, и фильтрации в цепях прохождения сигналов синфазных и дифференциальных помех, необходимых для уменьшения случайной составляющей погрешности измерения, а также быстродействию измерения. Приводятся также требования по обеспечению соответствия шкалы характеристики аналого-цифрового преобразования и её разрешающей способности требуемым для первичных преобразователей $ДТ_1$ – $ДТ_N$ рабочим диапазонам измерения температуры и чувствительностей их градуировочных характеристик, а также соответствие этим диапазонам уровней внутренних опорных и эталонных (калибровочных) сигналов в схеме измерения каждого канала контроля, определяющих начало шкалы рабочих диапазонов измерения и калибровочные точки внутри этих диапазонов.

К СПО ЦПМ предъявляются требования по обмену цифровой информацией с ИМКТ по внутриприборному последовательному периферийному интерфейсу (ППИ) и обработки в соответствии с заданными алгоритмами принятой из ИМКТ цифровой информации о результатах измерения уровней сигналов первичных преобразователей в каналах контроля и в калибровочных точках, а также выдачи в цифровом виде откалиброванных результатов измерения по мультиплексному каналу обмена (МКО) во внешнее устройство регистрации, входящее в состав бортового цифрового вычислительного комплекса (БЦВК). Указываются требования по взаимодействию ЦПМ с БЦВК, которое должно происходить по инициативе БЦВК с заданной периодичностью и осуществляется по МКО в соответствии с ГОСТ Р 52070-2003 [7]. В требованиях к СПО ЦПМ приводятся алгоритмы проведения автокалибровок полученных из ИМКТ результатов измерений, основанные на решении линейных

калибровочных уравнений для заданных характеристик преобразования каждого канала контроля.

Кроме того, с помощью ЦПМ могут решаться и другие задачи, направленные на повышение достоверности результатов измерения (например, прецизионная линейаризация сигналов и компенсация, зависящая от нелинейности градуировочной характеристики и разброса параметров первичных преобразователей, диагностика неисправностей, формирование произвольных отчётов о результатах измерения, изменение параметров конфигурации ИМКТ и ряд других математических операций, чтобы получить точное представление об измеряемой температуре).

Анализ технических характеристик первичных преобразователей

В качестве первичных преобразователей, устанавливаемых для контроля температуры на элементах конструкции КА, широкое применение нашли различные типы термопреобразователей сопротивления, принцип действия которых основан на зависимости электрического сопротивления металла от температуры. Термопреобразователь сопротивления (ТС) представляет собой средство измерения температуры, состоящее из одного или нескольких чувствительных элементов сопротивления и внутренних соединительных проводов, помещённых в герметичный защитный корпус, внешних клемм или выводов, предназначенных для подключения к измерительному прибору. По ГОСТ 6651-2009 чувствительным элементом (ЧЭ) таких ТС является медь, платина и никель [8]. Характеристики изменения сопротивления в зависимости от температуры для ЧЭ ТС из указанных материалов показаны на рис. 2.

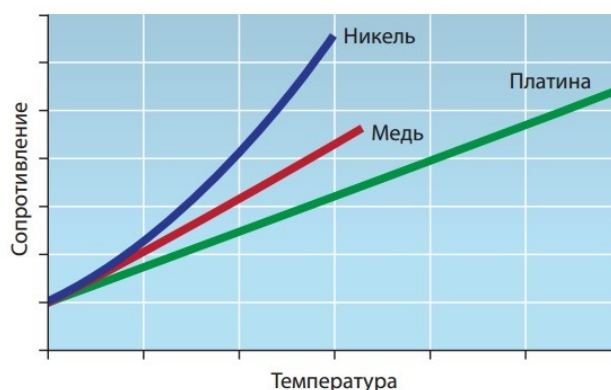


Рис. 2. Характеристики изменения сопротивления в зависимости от температуры для ЧЭ

В стандарте приведены для ТС диапазоны измерения, классы допуска, таблицы номинальных статических характеристик и стандарт-

ные зависимости сопротивление-температура. ГОСТ 6651-2009 соответствует международному стандарту МЭК 60751 (2008) [9].

Нормируемыми параметрами ТС или ЧЭ для построения номинальной статической характеристики (зависимости сопротивления ТС или ЧЭ от температуры) являются номинальное сопротивление R_0 при 0 °С и температурный коэф-

фициент сопротивления $\alpha = (R_{100} - R_0) / (R_0 \times 100 \text{ °С})$, где R_{100} – сопротивление при 100 °С. Связь между изменением сопротивления ТС и температурой, устанавливаемой температурным коэффициентом сопротивления α , также часто называют α -характеристикой ТС. Типы ТС и ЧЭ, на которые распространяется указанный стандарт, приведены в табл. 1 [8].

Таблица 1

Типы ТС и ЧЭ согласно ГОСТ 6651-2009

Тип ТС	Обозначение типа ТС	α , °С ⁻¹	Класс допуска		
			для проволочных ЧЭ	для плёночных ЧЭ	для ТС
Платиновый	Pt	0,00385	W0.1, W0.15, W0.3, W0.6	F0.1, F0.15, F0.3, F0.6	AA, A, B, C
	П	0,00391	AA, A, B, C	AA, A, B, C	AA, A, B, C
Медный	M	0,00428	A, B, C	–	A, B, C
Никелевый	N	0,00617	C	–	C

Температурный коэффициент α нормируется для конкретного материала и состава сплава. Медные (М), платиновые (П или Pt) и никелевые (Н) ЧЭ имеют разные коэффициенты α , и у самих платиновых ЧЭ коэффициенты тоже могут быть разными, в зависимости от чистоты платины и состава сплава. Значения коэффициента α определяют взаимозаменяемость ТС. Разные ТС с одним и тем же коэффициентом α гарантируют, что зависимость сопротивления от температуры останется неизменной в пределах указанного для ТС класса допуска. Класс допуска ТС указывает, насколько близка его α -характеристика к идеальной линейной зависимости.

В широком диапазоне температур, соответствующему диапазону измерения ТС, зависимость сопротивления ТС от температуры $R(t)$ является нелинейной и даёт слишком большую погрешность, поэтому для исключения влияния систематической составляющей нелинейности ТС на результат измерения стандарт рекомендует для расчёта номинальной статической характеристики ТС в пределах диапазона измерений использовать нелинейные уравнения, или выполнять его индивидуальную градуировку с получением индивидуальных коэффициентов зависимости сопротивления от температуры, требующих для измерения температуры использования специальных процедур исключения погрешности нелинейности на основе альтернативных интерполяционных уравнений [8]. Однако в узком диапазоне температур (от 0 до +100 °С), для которого нормируются R_0 и α , зависимость $R(t)$ можно считать приближённо в пределах указанного для ТС класса допуска линейной $R(t) = R_0(1 + \alpha t)$

и для измерения температуры использовать методы, основанные на решении линейных уравнений.

Величину погрешности, возникающей при линейной аппроксимации характеристики по нормируемым точкам диапазона 0 °С и +100 °С, можно оценить для конкретного типа ТС по отклонению графика нелинейной зависимости $R(t)$, приведённой для указанного в стандарте температурного диапазона измерений, от прямой линии [8]. Для медных ТС и ЧЭ с $\alpha = 0,00428 \text{ °С}^{-1}$ в диапазоне измерений от 0 °С до +200 °С зависимость $R(t) = R_0(1 + \alpha t)$, т. е. совпадает с линейной аппроксимацией. Для платиновых ТС и ЧЭ с $\alpha = 0,00391 \text{ °С}^{-1}$ в диапазоне измерений от 0 °С до +850 °С необходимо пользоваться нелинейной зависимостью $R(t) = R_0(1 + At + Bt^2)$, где $A = 3,969 \times 10^{-3} \text{ °С}^{-1}$ и $B = -5,841 \times 10^{-7} \text{ °С}^{-2}$. Аналогично для никелевых ТС и ЧЭ с $\alpha = 0,00617 \text{ °С}^{-1}$ в диапазоне измерений от -60 °С до +100 °С необходимо пользоваться нелинейной зависимостью $R(t) = R_0(1 + At + Bt^2)$, где $A = 5,4963 \times 10^{-3} \text{ °С}^{-1}$ и $B = 6,7556 \times 10^{-6} \text{ °С}^{-2}$.

Информация о погрешности линейной аппроксимации помогает принять верное решение о целесообразности прецизионной линеаризации характеристики ТС, которая может потребовать использования дополнительных компонентов, вычислительных ресурсов процессорной части измерительного прибора или ограничиться линейной аппроксимацией. После исключения (в случае необходимости) систематической составляющей погрешности нелинейности ТС остаётся случайная составляющая, обусловленная технологическим разбросом его номинального сопротивления R_0 при

0 °С и разбросом температурного коэффициента α . Эта погрешность вносит основной вклад в результат измерения температуры и нормируется для различных типов ТС в соответствии с классом допуска.

Наиболее широкое применение нашли ТС с ЧЭ из платины (П) и меди (М). Их достоинством является высокая точность, превосходная повторяемость и исключительная линейность номинальной статической характеристики в широком диапазоне температур. Медные ЧЭ имеют низкую цену и наилучшую линейность зависимости сопротивления от температуры, но позволяют производить измерения в более узком диапазоне, платиновые имеют высокую стабильность (не-

изменность показаний с течением времени) и позволяют производить измерения в более широком диапазоне. Использование ТС с никелевым (Н) ЧЭ ограничено ввиду их недостаточной точности и линейности, а также сравнительно узкого диапазона измерения.

Существует несколько классов допусков ТС, которые устанавливают взаимосвязь между допустимой погрешностью при рабочей температуре и эталоном в пределах диапазона измерения, указанного для каждого типа ТС. Для широко используемых платиновых и медных ТС классы допусков и предъявляемые к ним установленные стандартом требования приведены в табл. 2 [8].

Таблица 2

Классы допуска платиновых и медных ТС согласно ГОСТ 6651-2009

Класс допуска	Допуск, °С	Диапазон измерений, °С		
		Платиновый ТС, ЧЭ		Медный ТС, ЧЭ
		Проволочный ЧЭ	Плёночный ЧЭ	
АА	$\pm(0,1+0,0017 t)$	От -50 до +250	От 0 до +150	—
А	$\pm(0,15+0,002 t)$	От -100 до +450	От -30 до +300	От -50 до +120
В	$\pm(0,3+0,005 t)$	От -196 до +660	От -50 до +500	От -50 до +200
С	$\pm(0,6+0,01 t)$	От -196 до +660	От -50 до +600	От -180 до +200

Примечание: $|t|$ – абсолютное значение температуры, °С, без учёта знака

Следует отметить, что допустимая погрешность увеличивается по мере того, насколько температура отдалена от точки 0 °С, где сопротивление равно R_0 . Чтобы определить допустимую абсолютную погрешность измерения при рабочей температуре для выбранного класса допуска ТС, необходимо при расчёте допуска воспользоваться соответствующим выражением из табл. 2.

Допуски ТС и ЧЭ по сопротивлению при температуре t получают умножением допусков из табл. 2 на коэффициент чувствительности dR/dt [Ом/°С] при температуре t , определённый по интерполяционным уравнениям нелинейной зависимости $R(t)$ [8]. В узком диапазоне температур, в котором зависимость $R(t)$ линейна, коэффициент чувствительности $dR/dt = \alpha R_0$.

Наиболее широкое применение в практике нашли платиновые и медные ТС классов А и В. Эти классы используются для определения допуска отклонения характеристик ТС от идеальных, описанных международным стандартом МЭК 60751 (IEC 60751), в целях их взаимозаменяемости [9]. При этом ТС класса В имеют почти вдвое больший допуск отклонения, чем ТС класса А (рис. 3).

Существуют различные виды ТС, обеспечивающие большое разнообразие способов их установки на элементы конструкции [10]. Каждый из них имеет свои отличительные черты для каждого способа применения и установки. ТС могут быть

либо погружаемыми в рабочую среду технологического процесса, либо монтируемыми на поверхности. Выбор способа монтажа зависит от применения, условий технологического процесса и ограничений, налагаемых окружающей средой.

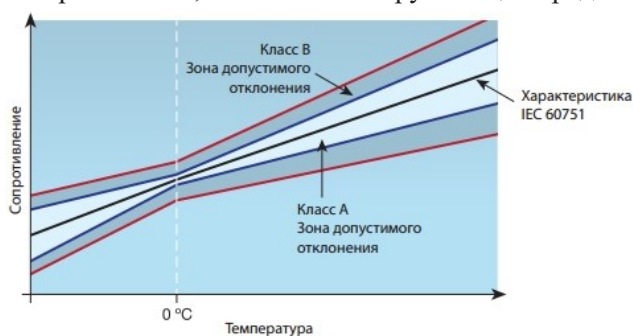


Рис. 3. Идеальная характеристика и допустимые отклонения от неё для ТС классов А и В

Два наиболее широко распространённых вида ТС – это проволочные и тонкоплёночные. Проволочные ТС изготавливаются либо путём намотки резистивной проволоки на керамический сердечник, либо в виде спирально навитой проволоки, заключённой в защитную оболочку (поэтому они и получили название «проволочные»). Для изготовления тонкоплёночных ТС тонкое резистивное покрытие наносится на плоскую (обычно прямоугольную) керамическую подложку.

Проволочные ТС нашли более широкое применение, так как они, по сравнению с плёночными, дают более стабильные результаты измерения. Однако иногда возникает необходимость использования тонкоплёночных ТС, так как они обладают минимальной тепловой инерционностью, а также большей устойчивостью к вибрации и, следовательно, более длительным сроком службы.

ТС с ЧЭ из платины выпускаются различных видов, включая проволочные и тонкоплёночные, а ТС с ЧЭ из меди – только проволочные. Конструктивно проволочные и тонкоплёночные ТС бывают различных модификаций с номинальными сопротивлениями из стандартизованного для каждого вида ТС ряда в пределах диапазона от 10 до 1000 Ом.

Конструкция ТС позволяет использовать их в цепях постоянного и переменного токов с частотой до 100 Гц.

Выводы корпуса ТС представляют собой прикреплённые к ЧЭ изолированные проводники, проходящие через защитную оболочку. Эти проводники имеют уплотнения на конце оболочки и используются для соединения ТС с точками под-

ключения измерительного прибора либо непосредственно, либо через дополнительные удлинительные провода.

По схеме подключения выводов, в зависимости от класса допуска, существуют двух-, трёх- или четырёхпроводные ТС, при этом в корпусе ТС могут содержаться один или два ЧЭ. Схемы соединения внутренних проводников ТС и маркировка выводов согласно требованиям стандарта показаны на рис. 4 [8].

В схеме подключения простейшего ТС используется два провода. Такая схема ТС используется там, где не требуется высокой точности измерения, так как сопротивление подводящих проводов включается в измеренное сопротивление и приводит к появлению дополнительной погрешности. ТС с двухпроводной схемой подключения изготавливают только по классу допуска В и С. При изготовлении имеются ограничения по монтажным длинам и длинам удлинительных проводов. В соответствии с требованиями стандарта следует обеспечить, чтобы сопротивление внутренних проводников ТС не превышало 0,1 % номинального сопротивления ТС при 0 °С [8].

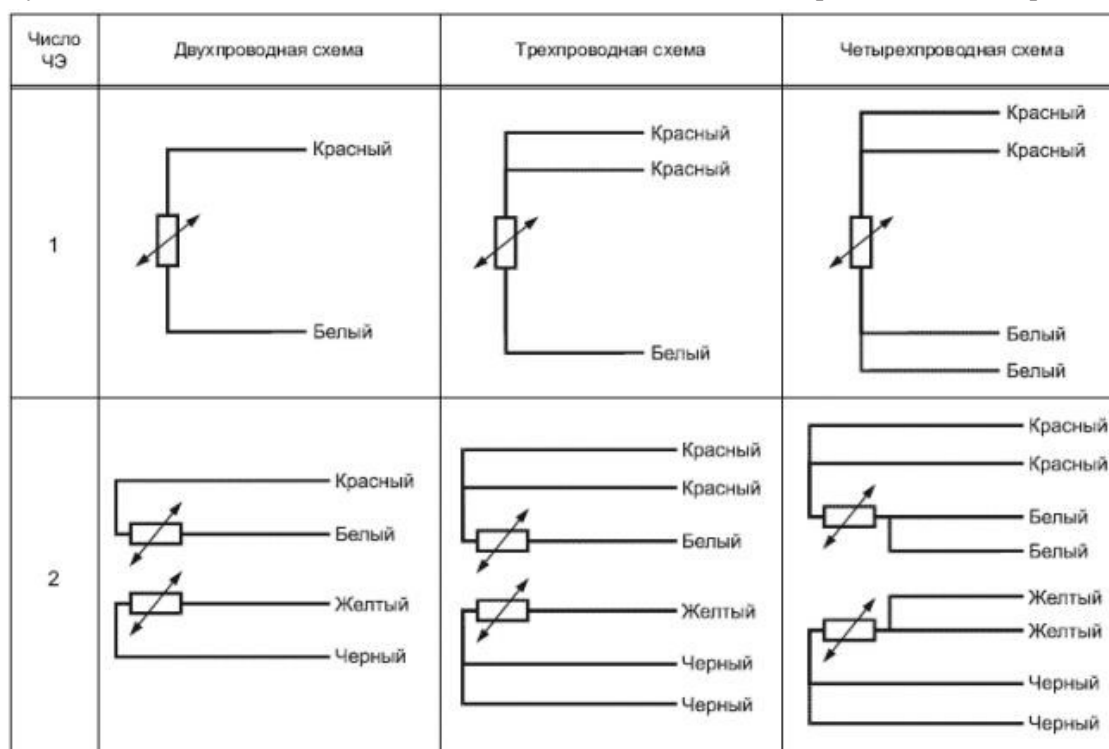


Рис. 4. Схемы соединения внутренних проводников ТС и маркировка выводов

Трёхпроводная схема обеспечивает значительно более точные измерения за счёт того, что появляется возможность измерить в отдельном опыте сопротивление подводящих проводов и учесть их влияние на точность измерения сопротивления ТС. Четырёхпроводная – наиболее точная схема, обеспечивает полное исключение влияния подводящих проводов. ТС с трёх- и четырёх-

проводной схемой подключения изготавливают в зависимости от конструктивных модификаций по классу допуска АА, А, В и С. При изготовлении ограничения по монтажным длинам и длинам удлинительных проводов отсутствуют.

Следует учитывать, что метрологические характеристики, нормируемые стандартом, распространяются на ЧЭ ТС при подключении к внешним

клеммам или выводам в соответствии с указанной изготовителем схемой. Если на корпусе ТС с двухпроводной схемой указано значение сопротивления внутренних проводников, то оно должно быть вычтено из значения измеренного сопротивления ТС.

Следует также учитывать, что у измерительных приборов, к которым подключают ТС, могут существовать ограничения по входным сопротивлениям измерительных линий связи, зависящим от длины удлинительных проводов ТС.

Учитывая тот факт, что в ряде случаев первичные преобразователи при эксплуатации невозможно заменить, часто отдают предпочтение ТС с двумя ЧЭ. Сдвоенные ЧЭ обеспечивают резервированное измерение, что может оказаться полезным для контроля дрейфа показаний в режиме горячего резервирования с помощью методики сравнения или для формирования входных сигналов на два независимых контроллера или две системы (например, систему управления и систему телеметрического контроля).

На точность измерения также влияет самонагрев ТС. Повышение температуры ТС вызвано нагревом ЧЭ измерительным током $I_{из}$, подаваемым от измерительного прибора. Более высокий измерительный ток, с одной стороны, увеличивает температурную чувствительность ТС, пропорциональную силе тока, с другой стороны, вызывает самонагрев ЧЭ, что приводит к дополнительной погрешности. Самонагрев ЧЭ зависит от мощности тепловыделения, которая возрастает пропорционально квадрату силы тока, коэффициентом пропорциональности которой является электрическое сопротивление ЧЭ, и интенсивности рассеяния тепловой энергии. Поэтому величину измерительного тока выбирают, исходя из конкретных условий измерения. В частности, принципиальное значение имеет теплопроводность среды (воздух, вода, контакт с металлом), в которой находится ТС.

Для уменьшения эффекта самонагрева ЧЭ следует снижать величину измерительного тока $I_{из}$, однако это приводит к уменьшению отношения сигнала к шуму и увеличению случайной составляющей погрешности измерений. Для уменьшения погрешности измерений изготовитель устанавливает значение допустимого измерительного тока для конкретного типа ТС (обычно 1–3 мА). Однако лучшие результаты дает измерение с помощью импульса, длительность которого выбирают из условия минимизации энергии, поступающей в ЧЭ за время измерения. Поскольку в импульсном режиме среднее значение измерительного тока может быть задано очень малым (обычно не более 200–250 мкА), выделяющееся тепло на ЧЭ также будет очень мало и будет оказывать пренебрежимо малое влияние на точность измерения.

Источником погрешности измерений с помощью ТС также являются термоэлектрический

эффект, который проявляется в виде термоэлектродвижущей силы (ТЭДС) в измерительной цепи ТС в условиях температурных градиентов вследствие использования различных металлов и их неоднородности, и гистерезис, который проявляется в виде разности показаний ТС при одной и той же температуре, полученных в температурных циклах при нагреве и охлаждении ТС [8]. Обычно ТЭДС не превышает 20 мкВ и не приводит к выходу ТС из класса допуска, а изменения показаний ТС в одной и той же температурной точке после термоциклирования остаются в пределах допуска соответствующего класса.

Важный параметр при эксплуатации первичных преобразователей для измерения температуры – быстродействие ТС, которое непосредственно влияет на точность измерения в технологических процессах с большой скоростью изменения температуры окружающей среды. Быстродействие ТС – это время термической реакции, которое необходимо для изменения показаний ТС на определённый процент полного изменения при ступенчатом изменении температуры среды при определённом наборе условий.

Следует отметить, что существуют разные стандарты на испытания с целью определения быстродействия, которые приводят к результатам, варьирующимся в широких пределах. Сравнить быстродействие ТС можно только в том случае, если испытания ТС проводятся по одному стандарту при одинаковых условиях.

Быстродействие ТС обычно указывают в секундах в виде значения « t », а рядом указывают уровень сигнала в процентах, при котором это время регистрируют [10]. Например, $t(0,5)$ означает быстродействие для уровня ступенчатого изменения 50 %, а $t(0,9)$ означает быстродействие для уровня ступенчатого изменения 90 %. Типичное быстродействие ТС приведено на рис. 5.

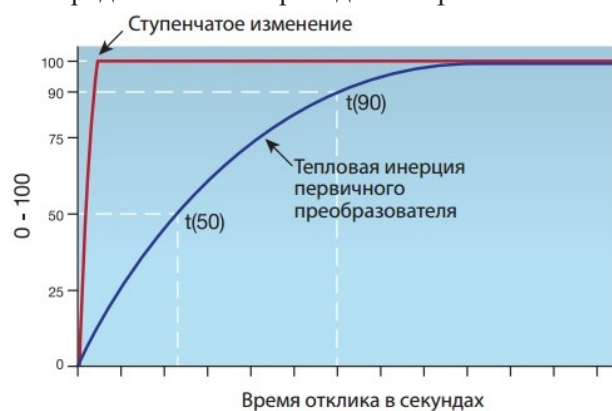


Рис. 5. Типичное быстродействие ТС

Быстродействие и точность измерения первичных преобразователей зависят от вида и размеров ТС, а также теплового сопротивления между ЧЭ и контролируемой средой. Тонкоплёночные

ТС обладают минимальной тепловой инерционностью (в 5–10 раз меньше, чем у проволочных ТС). Для повышения быстродействия отдают предпочтение ТС меньших размеров, потому что они имеют меньшую массу и меньше изолирующего материала. ТС меньших размеров также обеспечивают более точное измерение благодаря меньшей погрешности, обусловленной теплопроводностью защитной оболочки, в которую помещён ЧЭ.

При эксплуатации первичных преобразователей также необходимо учитывать стабильность и дрейф показаний ТС. Стабильность связана с величиной дрейфа показаний ТС и представляет собой взаимосвязь изначальной характеристики сопротивления ТС с его характеристикой после некоторого периода эксплуатации. Стабильность и дрейф показаний нормированы техническими документами на ТС конкретных типов и обычно подтверждаются после выдержки при температуре верхнего предела рабочего диапазона температур в течение 1000 ч.

Для ТС, предназначенных для длительного использования без поверки, и для ТС, устанавливаемых на особо важных объектах, предъявляются повышенные требования к стабильности. В этом случае отдают предпочтение ТС с платиновыми ЧЭ, обладающими по сравнению с медными ЧЭ большей стабильностью.

На стабильность ТС с платиновыми ЧЭ в объектах эксплуатации влияют различные факторы, определяемые конкретными условиями эксплуатации, которые приводят в зависимости от температуры к неодинаковому смещению номинального сопротивления R_0 со временем [10]. Определенно эта стабильность будет несколько хуже, чем дрейф показаний, указанный при 0 °С в контролируемой среде (рис. 6).

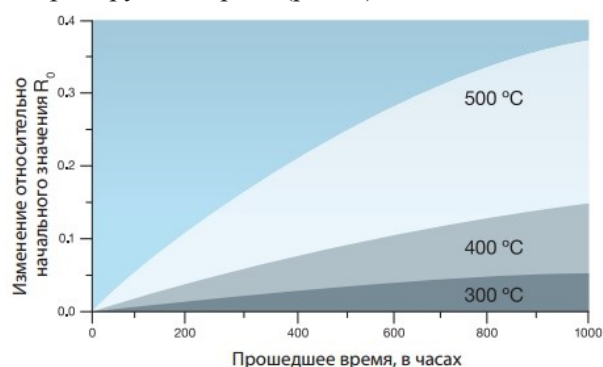


Рис. 6. Смещение R_0 со временем в зависимости от температуры

Эксплуатация при более высоких температурах сильно увеличивает скорость дрейфа показаний. Например, при 500 °С дрейф может составить 0,35 °С через 1000 часов работы.

Факторами, влияющими на стабильность ТС, могут быть термические и механические на-

пряжения, которые вызывают физические изменения в кристаллической структуре платины, приводящие к отклонению от штатной кривой зависимости сопротивления от температуры. Химические реакции, в которых участвует платина и примеси, а также перенос внутренних материалов, также могут оказывать влияние на стабильность ТС. Эксплуатация при повышенных температурах увеличивает скорость химических реакций, чем вызывает увеличение дрейфа показаний. Дрейф, вызванный этими условиями, обычно не является катастрофическим и его можно считать очень маленьким при эксплуатации при температурах ниже 300 °С (обычно изменение в точке $R_0 < \pm 0,05$ °С).

Периодическое повторение режимов работы также вносит небольшой вклад в дрейф показаний, который увеличивается по мере роста количества накопленных периодических циклов повторения режимов работы и максимальной температуры, достигаемой в каждом цикле. Обычно этот вклад пренебрежимо мал.

Ещё одним фактором влияния на стабильность ТС может быть шунтирующий эффект из-за снижения сопротивления изоляции. Для ТС под сопротивлением изоляции понимают электрическое сопротивление между внешними выводами ТС и защитным корпусом, а также между цепями ТС с двумя или более ЧЭ при комнатной или другой заданной температуре. Корпус ТС для защиты от внешней среды обычно заполняется неорганической изоляцией, которая снижает воздействие вибрации и ударов на ТС. Однако материалы такой изоляции в большой степени гигроскопичны и при попадании небольшого количества влаги в ТС происходит эффект шунтирования ЧЭ. Кроме того, электрическое сопротивление изоляции зависит от температурных условий эксплуатации. Для ТС электрическое сопротивление изоляции при различных температурах согласно требованиям стандарта должно быть не менее значений, указанных в табл. 3 [8].

Таблица 3

Нормированные значения
электрического сопротивления изоляции ТС

Диапазон температур, °С	Электрическое сопротивление изоляции, МОм
15–35	100
100–250	20
251–450	2
451–650	0,5
651–850	0,2

При эксплуатационных условиях, когда шунтирующий эффект сопротивления изоляции может оказывать существенное влияние, для из-

мерения температуры используют модели ТС с низкоомными значениями номинальных сопротивлений R_0 , однако в этом случае учитываются ограничения, связанные с уменьшением разрешающей способности ТС и увеличением влияния сопротивлений подводящих проводов на точность измерения. Если условия эксплуатации таковы, что шунтирующий эффект сопротивления изоляции проявляется незначительно, предпочтительнее использовать модели ТС с высокоомными значениями номинальных сопротивлений R_0 , дающим большее разрешение и тем самым обеспечивающим более точное измерение.

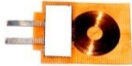
Для контроля температуры на элементах конструкции КА, обеспечивающих тепловой режим бортовой аппаратуры, используют только первичные преобразователи, монтируемые на поверхности. С учётом реальных эксплуатационных ограничений, накладываемых на первичные преобразователи, и различных факторов, влияющих на точность и стабильность измерения температуры, наиболее часто применяют для поверхностного монтажа несколько видов двухпроводных ТС с ЧЭ из меди типа

ТМ (модификации ТМ 293-05 и ТМ 293-06) и платины типов ТП (с разделкой токовыводов – модификация ТП 110-11) и ТЭП (без разделки токовыводов ЧЭ – модификации ТЭП 012-05 и ТЭП 018-06) с номинальными сопротивлениями 100 Ом (низкоомные) и 500 Ом (высокоомные), основные технические характеристики которых приведены в табл. 4.

Для измерения температуры все приведённые в табл. 4 двухпроводные типы ТС могут быть подключены к измерительному прибору по трёх- или четырёхпроводной схеме измерения с помощью дополнительных удлинительных проводов. Модификации ТС с платиновыми ЧЭ типа ТЭП 012-05 и ТЭП 018-06 изготавливают без разделки выводов, что позволяет соединять дополнительные удлинительные провода непосредственно на выводах ЧЭ без использования соединителей, тем самым исключив в линиях связи влияние сопротивлений их контактов на точность измерения. Такое решение может быть особенно полезным, если требуется получить повышенную точность и стабильность результатов измерения при трёхпроводной схеме подключения.

Таблица 4

Основные технические характеристики типов ТС, наиболее часто используемых для контроля температуры на элементах конструкции КА

Тип ТС	ТМ 293-05	ТМ 293-06	ТП 110-11	ТЭП 012-05	ТЭП 018-06
Фотография ТС (внешний вид)					
Наименование	Медный ЧЭ БЫ2.821.293ТУ		Платиновый ЧЭ БЫ2.821.110ТУ	Платиновый ЧЭ БЫ6.036.012ТУ	Платиновый ЧЭ БЫ6.036.012ТУ
Назначение	Измерение температуры плоской поверхности		Измерение температуры плоской поверхности	Измерение температуры поверхности трубопроводов	Измерение температуры плоской поверхности
Диапазон измерения, °С	–196 ... +200		–260 ... +300	–260 ... +300	–260 ... +300
Номинальное сопротивление, при 0 °С, Ом	100	500	100	100	500
Температурный коэффициент сопротивления, 1/°С	0,00428		0,00391	0,00391	0,00391
Измерительный ток, мА, не более	3	1	3	3	1
Показатель термической инерции, с, не более	0,3		0,01	0,01	0,01
Сопротивление изоляции в НУ, МОм, не менее	20		20	20	20

Заключение

Модификации ТС с медными ЧЭ имеют большую тепловую инерцию и применяются

там, где быстроедействие не является определяющим фактором при измерении температуры. Модификации ТС с платиновыми ЧЭ имеют меньшую тепловую инерцию, поэтому их применяют в

том случае, если при измерении температуры требуется более высокое быстродействие.

Выбор различных номинальных сопротивлений ТС обусловлен необходимостью контроля температуры на различных элементах конструкции КА в различных рабочих диапазонах измерения. Низкоомные ТС с номинальным сопротивлением 100 Ом имеют меньшее разрешение, поэтому используются для контроля температур в широком диапазоне измерения. Как правило, в этом случае не предъявляются высокие требования к точности

и стабильности измерения. Высокоомные ТС с номинальным сопротивлением 500 Ом, напротив, имеют большее разрешение, поэтому используются для контроля температур в более узком диапазоне измерения, в котором необходимо поддерживать высокую точность и стабильность измерения.

Все приведённые различия в технических характеристиках рассмотренных ТС и условий их применения необходимо учитывать при определении структуры унифицированного многоканального ИМКТ.

Список литературы

- [1] Горностаев А. И., Капустин А. Н., Зубавичус В. А., Колесников С. М. Применение магистрально-модульного принципа при построении бортовой аппаратуры бортового комплекса управления космических аппаратов // Материалы XIII Международной научной конференции «Решетневские чтения» / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосм. ун-т. Красноярск, 2009. Ч. 1. С. 20–22.
- [2] Горностаев А. И. Унификация интерфейсных модулей сопряжения блоков бортового комплекса управления // Известия вузов. Приборостроение. 2011. № 4. С. 13–18.
- [3] Ощепкова Д. Г., Долганов Е. С., Горностаев А. И. Проектирование унифицированных модулей приборов бортового комплекса управления космических аппаратов с применением микроконтроллеров // Материалы XVIII Международной научной конференции «Решетневские чтения» / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосм. ун-т. Красноярск, 2014. Ч. 1. С. 238–240.
- [4] Горностаев А. И., Тульский И. Н., Ощепкова Д. Г. Экспериментальный блок коммутации нагревателей модуля системы прецизионной термостабилизации // Материалы XVII Международной научной конференции «Решетневские чтения» / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосм. ун-т. Красноярск, 2013. Ч. 1. С. 9–12.
- [5] Горностаев А. И. Блок управления нагревателями аппаратуры космического аппарата. Пат. № 2660098, Российская Федерация, 2018, бюл. № 19.
- [6] Чеботарев В. Е., Деревянко В. А., Макуха А. В., Бакиров М. Т. Космический эксперимент по прецизионной термостабилизации квантовых стандартов частоты навигационных спутников // Космические аппараты и технологии. 2018. Т. 2. № 4. С. 187–191.
- [7] ГОСТ Р 52070-2003. Интерфейс магистральный последовательный системы электронных модулей. Общие требования. М. : Изд-во стандартов, 2003.
- [8] ГОСТ 6651-2009. Термопреобразователи сопротивления из платины, меди и никеля. Общие технические требования и методы испытания.
- [9] Международный стандарт МЭК 60751 (2008-07). Промышленные чувствительные элементы термопреобразователей сопротивления из платины (Industrial platinum resistance thermometers and platinum sensors).
- [10] Термопреобразователи сопротивления. Виды, устройство, монтаж, подключение термопреобразователей сопротивления [Электронный ресурс]. URL: http://www.eti.su/articles/izmeritelnaya-tehnika/izmeritelnaya-tehnika_1517.html (дата обращения: 15.04.2019).

PROBLEMS OF UNIFICATION OF MULTI-CHANNEL INTERFACE TEMPERATURE CONTROL MODULE FOR MEASURING INSTRUMENTS OF SPACECRAFT

A. I. Gornostaev

*JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems,
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation*

An important stage in the development of a unified multichannel interface module for temperature control, which is part of the measuring instruments and that monitors the temperature on the structural elements

of the spacecraft, is the analysis of technical requirements for measuring instruments and their operating conditions that can affect the structure of the module.

The article is devoted to the analysis of general requirements for measuring instruments of spacecraft, built on the basis of the main-modular principle based on the central instrument module and containing an interface module for temperature control, as well as the analysis of the technical characteristics of primary converters connected to measuring instruments of various types.

It is shown that the interface modules for temperature control, which have control channels with different measuring ranges, have different requirements for accuracy and stability of temperature measurement, and thermal transducers of resistance with copper and platinum sensors with nominal resistances 100 Ohm and 500 Ohm of are most often used as primary transducers for temperature control. With low requirements for accuracy and stability of temperature measurement 100-Ohm thermal converters are used, with increased requirements for accuracy and stability of temperature measurement resort to the use of 500-Ohm thermal converters. If a high speed temperature measurement is not required, then resistance thermal converters with copper sensors are used. If you need high performance and increased measurement stability, then use thermal converters of resistance with platinum sensitive elements.

Keywords: spacecraft, temperature control, measurement accuracy and stability, measuring instrument, primary converter, thermal resistance converter.

References

- [1] Gornostaev A. I., Kapustin A. N., Zubavichus V. A., Kolesnikov S. M. *Primeneniye magistral'no-modul'nogo printsipa pri postroyenii bortovoy apparatury bortovogo kompleksa upravleniya kosmicheskikh apparatov* [The use of the trunk-modular principle in the construction of the onboard equipment of the onboard complex control spacecraft]. *Materialy XIII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Reshetnevskie chteniya»*. Sib. gos. aerokosmicheskiiy un-t. Krasnoyarsk, 2009, part 1, pp. 20–22. (In Russian)
- [2] Gornostaev A. I. *Unifikatsiya interfeysnykh moduley sopryazheniya blokov bortovogo kompleksa upravleniya* [Unification of interface modules for interfacing the onboard control complex unit]. *Proceedings of the universities. Instrument making*, 2011, no. 4. pp. 13–18. (In Russian)
- [3] Oshchepkova D. G., Dolganov E. S., Gornostaev A. I. *Proyektirovaniye unifitsirovannykh moduley priborov bortovogo kompleksa upravleniya kosmicheskikh apparatov s primeneniym mikrokontrollerov* [The design of the standardized modules of the devices of the onboard control complex of spacecrafts with the use of microcontrollers]. *Materialy XVIII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Reshetnevskie chteniya»*. Sib. gos. aerokosmicheskiiy un-t. Krasnoyarsk, 2014, part 1, pp. 238–240. (In Russian)
- [4] Gornostaev A. I., Tul'skiy, I. N., Oshchepkova D. G. *Eksperimental'nyy blok kommutatsii nagrevateley modulya sistemy pretsizionnoy termostabilizatsii* [Experimental switching unit of the heaters of the module of the system of precision thermal stabilization]. *Materialy XVII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Reshetnevskie chteniya»*. Sib. gos. aerokosmicheskiiy un-t. Krasnoyarsk, 2013, part 1, pp. 9–12. (In Russian)
- [5] Gornostaev A. I. *Blok upravleniya nagrevatelyami apparatury kosmicheskogo apparata* [Control unit for space vehicle equipment heaters]. Patent RU 2660098, 2018, bulletin no. 19. (In Russian)
- [6] Chebotarev V. E., Derevyanko V. A., Makukha A. V., Bakirov M. T. Space experiment for precision thermal stabilization of quantum frequency standards for navigation satellites // *Spacecraft and technologies*, 2018, vol. 2, no. 4, pp. 187–191. doi: 10.26732/2618-7957-2018-4-187-191
- [7] GOST R 52070-2003. *Interfeys magistral'nyy posledovatel'nyy sistemy elektronnykh moduley. Obshchiye trebovaniya* [Interface main serial system of electronic modules. General requirements]. Moscow, Publication of standards, 2003. (In Russian)
- [8] GOST 6651-2009. *Termopreobrazovateli soprotivleniya iz platiny, medi i nikelya. Obshchiye tekhnicheskiye trebovaniya i metody ispytaniya* [Thermal converters resistance from platinum, copper and nickel. General technical requirements and test methods]. (In Russian)
- [9] International standard IEC 60751 (2008-07). Industrial sensitive elements of the thermocouples of resistance made of platinum (Industrial platinum resistance thermometers and platinum sensors).
- [10] Thermal resistance transducers. Types, structure, installation, connection of resistance thermometers. Available at: http://www.eti.su/articles/izmeritelnaya-tehnika/izmeritelnaya-tehnika_1517.html (accessed: 15.04.2019).

Сведения об авторах

Анисимова Ольга Андреевна – техник 1 категории АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва». Окончила Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники в 2017 году. Область научных интересов: общесистемное проектирование космических комплексов.

Волошко Юрий Борисович – ведущий инженер АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва». Окончил Московский авиационный институт в 1977 году. Область научных интересов: общесистемное проектирование космических комплексов.

Горностаев Алексей Иванович – кандидат технических наук, начальник сектора АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва». Окончил Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники в 1980 году. Область научных интересов: методы повышения надёжности и принципы построения бортовой аппаратуры космических аппаратов, схемотехника аналоговых и цифровых электронных устройств, унификация функциональных узлов бортовой аппаратуры.

Двирный Валерий Васильевич – доктор технических наук, профессор базовой кафедры «Прикладная физика и космические технологии» Сибирского федерального университета. Окончил Московский авиационный институт в 1969 году. Область научных интересов: агрегаты систем космических аппаратов, защита интеллектуальной собственности.

Двирный Гурий Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии машиностроения» Сибирского государственного университета науки и технологий им. акад. М. Ф. Решетнёва. Окончил Сибирский федеральный университет в 2008 году. Область научных интересов: наземная экспериментальная отработка конструкций космических аппаратов.

Елфимова Марина Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры пожарно-технических экспертиз Сибирской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России. Окончила Восточно-Сибирский институт МВД России в 2008 году. Область научных интересов: космический мониторинг, надёжность и ресурс технических систем в экстремальных условиях.

Крушенко Генрих Гаврилович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института вычислительного моделирования СО РАН. Окончил Омский машиностроительный институт в

1955 году. Область научных интересов: вычислительное моделирование, нанотехнологии, литейные производства и инновации в машиностроении.

Кузнецова Мария Сергеевна – преподаватель. Окончила Красноярский педагогический университет в 2017 году. Область научных интересов: технический перевод, комплектующие систем космических аппаратов.

Мызникова Виктория Андреевна – студент Сибирского федерального университета.

Ружилова Ольга Владимировна – ведущий инженер-конструктор АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва». Окончил Красноярский государственный университет в 1992 году. Область научных интересов: общесистемное проектирование космических комплексов.

Чубарь Алексей Владимирович – кандидат технических наук, доцент. Доцент кафедры «Системы автоматизации, автоматизированного управления и проектирования» Сибирского федерального университета.

Шевчук Андрей Александрович – инженер АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва». Окончил Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М. Ф. Решетнёва в 2017 году. Область научных интересов: электроника, оптика, термовакuumные испытания космических аппаратов.

Шилко Илья Игоревич – кандидат технических наук, начальник сектора АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва». Окончил Красноярский государственный технический университет в 2006 году и Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М. Ф. Решетнёва в 2008 году. Область научных интересов: общесистемное проектирование космических комплексов.

Требования к оформлению статей для опубликования в журнале «Космические аппараты и технологии»

Редакция принимает в журнал статьи, соответствующие следующим темам:

- ◀ ракетно-космическая техника
- ◀ новые материалы и технологии в космической технике
- ◀ космическое приборостроение
- ◀ космические услуги
- ◀ инновации и экономика космической отрасли

Статья должна быть подготовлена в формате «Документ Word 97–2003» и направлена на электронную почту редакции isercit@gmail.com.

Вместе со статьей необходимо предоставить акт экспертного заключения с печатью и заключение комиссии экспортного контроля (КЭК) о возможности опубликования или, в случае отсутствия КЭК в организации, письмо за подписью руководителя организации с печатью, что данные сведения не подлежат экспортному контролю.

После принятия материалов автору будет выслан лицензионный договор и акт на право использования редакцией научной статьи при размещении в журнале и электронных базах данных.

Подписанный автором лицензионный договор и акт, а также оригиналы акта экспертного заключения и заключение КЭК должны быть высланы почтой на адрес редакции: 662972, а/я 57, Красноярский край, ЗАТО г. Железногорск. Ассоциация «ТП «НИСС».

При подготовке статьи авторы должны следовать этическим принципам, принятым в научном сообществе и редакцией журнала.

Авторы должны руководствоваться приведенными ниже правилами. Статьи, оформленные без соблюдения этих правил, могут быть возвращены авторам на доработку.

Требования к составу и расположению элементов оформления научной статьи:

- ◀ Индекс УДК располагают отдельной строкой слева.
- ◀ На следующей строке размещается заголовок, который центрируют и набирают строчными буквами (как в предложении, начиная с прописной). Шрифт Times New Roman, 14 кегль, начертание – полужирное. Перенос слов в заголовке недопустим.
- ◀ Под заголовком по центру указываются фамилия и инициалы автора(ов). Шрифт Times New Roman, 14 кегль, по центру, полуторный интервал.
- ◀ Под ФИО автора(ов) по центру указываются: полное название учреждения (место работы), в котором выполнена работа (в именительном падеже), затем город (населенный пункт), область (край), страна. Шрифт Times New Roman, 14 кегль, по центру, полуторный интервал.
- ◀ Аннотация к статье. Объем аннотации: 150–200 слов (равнение на английский вариант аннотации).
- ◀ Ключевые слова (4–7 слов или словосочетаний).
- ◀ Пристатейный библиографический список, оформленный в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008. Рекомендуется использование не менее 15 источников не старше 5 лет.
- ◀ Следом необходимо привести заголовок, ФИО автора(ов), организацию, аннотацию, ключевые слова и библиографический список на английском языке.
- ◀ В конце документа необходимо привести сведения о каждом авторе (должность и место работы, научные степень и звание, что и когда окончил, область научных интересов, e-mail).

Требования к представляемому тексту, иллюстрациям и приставному библиографическому списку:

- ◀ Объем статьи, включая иллюстрации и список литературы, 8–20 страниц формата А4 (210 x 297 мм).
- ◀ Поля – 2,5 см.
- ◀ Шрифт Times New Roman, 14 кегль, полуторный интервал, красная строка 1,27 см.
- ◀ Заголовок и аннотация статьи не должны содержать нерасшифрованных сокращений (аббревиатур) и ссылок на литературу. Объем аннотации: 150–200 слов.
- ◀ При использовании в тексте сокращённых названий необходимо давать их расшифровку, следует ограничиваться общепринятыми сокращениями и избегать новых без достаточных на то оснований.
- ◀ Для использования переносов в словах необходимо пользоваться командой «автоматическая расстановка переносов». Для форматирования текста не использовать пробелы (нигде в тексте не должно быть рядом стоящих двух пробелов).
- ◀ Для набора сложных математических формул и выражений используется MathType, дробные выражения в формулах рекомендуется по возможности заменять выражениями с отрицательными степенями либо использовать косую черту. Размер шрифта в формулах установить по умолчанию (12).
- ◀ Допускаются рисунки и таблицы без заголовков, подписей и слов «Таблица» и «Рис.» в случае одной таблицы/рисунка. Если имеется несколько рисунков или таблиц, используются слова «Таблица» или «Рис.» с указанием номера таблицы или рисунка. Не рекомендуется загромождать рисунок ненужными деталями: надписи должны быть вынесены в подпись к рисунку, а на рисунке заменены цифрами или буквами. Желательно не перегружать текст графическим материалом. Размер шрифта в таблицах 12 кегль. Межстрочный интервал – одинарный. Схемы, рисунки и другие графические элементы должны быть представлены дополнительно отдельным файлом в графическом формате.
- ◀ В тексте ссылки на цитируемую литературу даются в квадратных скобках в конце предложения перед точкой (например: [1], [1, 2] или [1–3] и т.д.). Библиографический список следует оформлять в порядке ссылок на неё по тексту, в списке должны быть только те источники, на которые есть ссылки в тексте. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Для книг: фамилия и инициалы автора, полное название книги, место издания, издательство, год, том или выпуск, общее количество страниц. Для периодических изданий: фамилия и инициалы автора, название статьи, название журнала, год издания, том, номер, первая и последняя страницы статьи. Литература нумеруется арабскими цифрами без использования автоматической нумерации. Рекомендуется использование не менее 15 (минимум 10) источников не старше 15 лет.



30^{-я} Международная НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

“ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА”

ДЕВИЗ:

ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА -
мост между Европой и Азией

СИМПОЗИУМЫ



Космическая робототехника

ТЕМАТИКА

- Орбитальные сервисные роботы и кластерная инфраструктура
- Планетоходы и робототехнические базы
- Роботизированные миссии на орбитальных станциях



Воздушная робототехника

ТЕМАТИКА

- Групповое управление
- Привязные дроны и их группировки
- Оптическая связь



Наземная робототехника

ТЕМАТИКА

- Мобильные платформы и манипуляторы
- Навигация и картографирование
- Связь и сети



Подводная робототехника

ТЕМАТИКА

- Подводные навигация и связь
- Обслуживание шельфового оборудования
- Роботы для геологоразведки

СЕМИНАРЫ



Робототехника для атомной отрасли

ТЕМАТИКА

- Автоматизированный радиационный мониторинг
- Роботизированный вывод реактора из эксплуатации
- Оборудование для аварийных служб



Медицинская робототехника

ТЕМАТИКА

- Ассистирование при хирургических операциях
- Роботизированные процедуры
- Экзоскелеты для восстановительной терапии



Образовательная робототехника

ТЕМАТИКА

- Молодежные соревнования
- Формирование креативного мышления
- Робототехника в образовании



Коллаборативная робототехника

ТЕМАТИКА

- Индустриальные коботы
- Взаимодействие человека и робота
- Мягкая робототехника и безопасность

Этапы и даты

Регистрация и предоставление материалов тезисов доклада; материалов доклада; экспертного заключения о возможности публикации

до 30 апреля 2019

Рассмотрение материалов Программным комитетом; уведомление участников о принятии докладов

до 15 мая 2019

Оформление участия

Для участия в конференции необходимо зарегистрироваться на сайте мероприятия: <http://er.rtc.ru/index.php/ru/reg> и направить материалы тезисов, докладов и экспертное заключение в Секретариат конференции на электронный адрес: mrspsb@rtc.ru

Стоимость участия и условия оплаты на сайте мероприятия.

Рабочий язык конференции: АНГЛИЙСКИЙ

Секретариат конференции:
Тел.: (812) 552-41-62, e-mail: mrspsb@rtc.ru



Сибирское отделение
Российской академии наук

Сибирское отделение РАН — крупнейшая научная организация востока России, нацеленная на комплексное решение стратегических задач территорий, корпораций и предприятий. На протяжении более 60 лет СО РАН развивает научные школы мирового класса, обеспечивает содержательное и организационное единство фундаментальной науки и прикладных задач, предлагает к внедрению сотни инновационных разработок.

Особенности СО РАН — это междисциплинарность, интегрирующая практически все науки, уникальная «физтеховская» система высшего образования в университетах Сибирского федерального округа, развитые ядерные, лазерные, информатико-вычислительные, химические, материаловедческие, агробиотехнологические и биомедицинские исследовательские платформы.

Сибирское отделение РАН на основе долговременных соглашений взаимодействует с федеральными ведомствами, с крупнейшими промышленными объединениями России и наукоемкими компаниями Сибирского макрорегиона.

Одно из основных направлений деятельности институтов СО РАН связано с тесным взаимоотношением с АО «Информационные спутниковые системы» им. М.Ф. Решетнева по созданию современных конкурентоспособных космических аппаратов и информационных систем нового поколения. Разработана программа совместных работ в рамках реализации научно-технического и инновационного сотрудничества на 2019—2024 годы.

Руководство СО РАН готово к установлению партнерских взаимоотношений и с вашей организацией: мы уверены, что сотрудничество с корпорацией сибирской науки принесет осязаемые результаты!

