

КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ И ТЕХНОЛОГИИ

SPACECRAFTS & TECHNOLOGIES



КА «Экспресс-А»
Производитель: АО «ИСС»

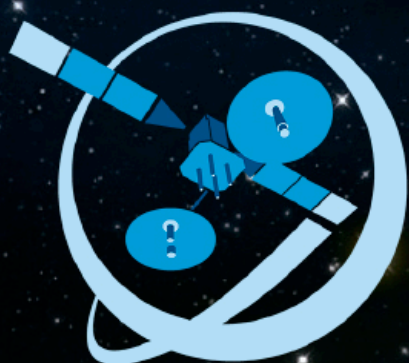


Технологическая платформа

НИСС

Национальная Информационная
Спутниковая Система

**№4 (34)
2020**



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 4

№ 4 (34)

2020

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)

Петрукович Анатолий Алексеевич
чл.-кор. РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор (Москва)

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)

Хартов Виктор Владимирович
д-р техн. наук, профессор (Королев)

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

Чернявский Александр Григорьевич
(Королев)

Ежеквартальный научный журнал

Издается с 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 2019 г. – 0,218.

«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, www.cyberleninka.ru

По решению Министерства науки и высшего образования Российской Федерации журнал «Космические аппараты и технологии» 11 июля 2019 года вошел в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Адрес учредителя, редакции и издателя:
662972, Красноярский край, ЗАТО г. Железногорск,
ул. Ленина, 52, корп. 4, ком. 224
E-mail: isercit@gmail.com; <http://www.journal-niss.ru>

Подписной индекс журнала в каталоге «Пресса России» 39491
Тираж 200 экз. Заказ 12513
Дата выхода в свет 24.12.2020

Отпечатано Библиотечно-издательским комплексом
Сибирского федерального университета
660041, Красноярск, пр. Свободный, 82а
Тел.: (391) 206-26-16; <http://bik.sfu-kras.ru>
E-mail: publishing_house@sfu-kras.ru

Свободная цена

Возрастная маркировка в соответствии
с Федеральным законом № 436-ФЗ: 16+

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)

Petrukovich Anatoly A.

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)

Chebotarev Victor E.

Doctor of Engineering, Professor (Russia)

Fateev Yury 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;
- Innovations 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,
www.cyberleninka.ru

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

**В. И. Гришин, М. А. Глебова, Ю. И. Дударьков,
Е. А. Левченко, М. В. Лимонин**
АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
И МЕТАЛЛО-КОМПОЗИТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
КОНСТРУКЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

**А. Б. Гладышев, Д. Д. Дмитриев, В. Н. Ратушняк,
А. В. Жгун, О. Б. Грицан**
СТЕНД ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРАВЛЕННЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕНН СПУТНИКОВЫХ
СИСТЕМ СВЯЗИ

КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

С. М. Голованов, В. И. Орлов, В. В. Федосов
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОНЯТИЙ ОДНОРОДНОСТИ
ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ
ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ
БАЗЫ КОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

И. Л. Крикунов, К. Э. Гаипов
ПРИМЕНЕНИЕ КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ
АППРОКСИМАЦИИ ВЕРОЯТНОСТНО-
ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ
МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

**В. В. Сухотин, А. С. Тихтенко,
А. В. Жгун, В. А. Сидорин**
ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТР ДЛЯ УСТРОЙСТВА
ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКА
РАДИОСИГНАЛА В СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМАХ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

ИННОВАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

В. Е. Чеботарев, Е. О. Воронцова
МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСАМИ
ОКОЛОЛУННОГО СПУТНИКА ДЛЯ
ПРОХОЖДЕНИЯ ТЕНЕВЫХ ЗОН БОЛЬШОЙ
ДЛИТЕЛЬНОСТИ

ROCKET AND SPACE EQUIPMENT

**V. I. Grishin, M. A. Glebova, Yu. I. Dudarkov,
E. A. Levchenko, M. V. Limonin**
STRENGTH ANALYSIS OF STRUCTURAL
ELEMENTS AND METAL-COMPOSITE JOINTS OF
A FLYING VEHICLE

**A. B. Gladyshev, D. D. Dmitriev, V. N. Ratushnyak,
A. V. Zhgun, O. B. Gritsan**
STAND FOR MEASURING THE DIRECTIONAL
CHARACTERISTICS OF ANTENNAS OF
SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS

SPACE INSTRUMENT ENGINEERING

S. M. Golovanov, V. I. Orlov, V. V. Fedosov
USING THE CONCEPTS OF HOMOGENEITY
IN ADDITIONAL TESTS OF ELECTRONIC
COMPONENTS FOR SPACE APPLICATIONS

I. L. Krikunov, K. E. Gaipov
APPLICATION OF PIECEWISE-LINEAR
APPROXIMATION OF PROBABILISTIC-TIME
CHARACTERISTICS OF QUEUING SYSTEMS

**V. V. Sukhotin, A. S. Tikhtenko,
A. V. Zhgun, V. A. Sidorin**
DIGITAL FILTER FOR DEVICE OF DETERMINING
COORDINATES OF RADIO SIGNAL SOURCE IN
SATELLITE TELECOMMUNICATIONS SYSTEMS

INNOVATIONS OF THE SPACE INDUSTRY

V. E. Chebotarev, E. O. Vorontsova
METHOD OF PROVIDING ENERGY RESOURCES
TO A CIRCUMLUNAR SATELLITE FOR PASSING
LONG-DURATION SHADOW ZONES

АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И МЕТАЛЛО-КОМПОЗИТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ КОНСТРУКЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

В. И. Гришин, М. А. Глебова, Ю. И. Дударьков,

Е. А. Левченко, М. В. Лимонин✉

*Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского,
г. Жуковский, Московская область, Российская Федерация*

В работе представлены результаты расчетных исследований прочности и несущей способности типовых элементов конструкции летательного аппарата и соединений. Расчеты проводились методом конечных элементов. Применялась нелинейная постановка задачи, реализованная в коммерческих программных кодах NASTRAN и ABAQUS. В качестве объектов исследований рассматривались силовые композитные панели и металло-композиционные стыки узлов крепления подвижных агрегатов. Приведены используемые модели, процедуры расчета и анализа получаемых результатов. Численные оценки прочности силовых панелей и стыка в дальнейшем были подтверждены экспериментально полученными данными. На примере виртуального моделирования эксперимента по прочностным испытаниям композитной панели в сдвиговой рамке дана оценка влияния условий эксперимента на получаемые результаты. Показано, что граничные условия, реализуемые при такого рода испытаниях, не всегда могут обеспечить требуемые значения критических усилий общей потери устойчивости, соответствующих шарнирному опиранию панели. Приведены результаты расчетного анализа прочности и устойчивости металло-композитного стыка узла навески подвижного агрегата. Исследования проводились на подробной модели с использованием объемных конечных элементов, с учетом контактного взаимодействия деталей в проушине узла, геометрической и физической нелинейности. Оценка прочности композита в болтовых соединениях проводилась на основе критерия Нуизмера. Даны рекомендации по усилению конструкции, что позволило избежать преждевременных разрушений при прочностных испытаниях рассмотренного соединения.

Ключевые слова: композитная панель, металло-композитное соединение, расчетная модель, критерий прочности, устойчивость, экспериментальные данные, разрушающая нагрузка.

Введение

В настоящее время в аэрокосмической технике наблюдается процесс интенсивного применения высокопрочных композиционных материалов в силовых элементах и агрегатах конструкции [1; 2]. В первую очередь, этот факт обусловлен повышенными требованиями к весовому совершенству проектируемых летательных аппаратов. Как правило, в качестве основы для конструктивных силовых схем ракетно-космических аппаратов рассматривают следующие решения: подкрепленная, трехслойная и сетчатая конструкция. Характерной особенностью первых

двух подходов является то, что их основные силовые элементы (обшивки и стрингеры) не являются однонаправленными структурами, что в некоторой мере снижает их весовую эффективность [3]. В сетчатых конструкциях, основными силовыми элементами в которых являются выполненные из однонаправленного композита ребра, реализуются достаточно высокие жесткостные и прочностные характеристики при обеспечении минимальной массы. Несмотря на то, что область применения сетчатых структур ограничена регулярными зонами, их эффективность подтверждена реальными примерами реализации в конструкциях отечественных ракетноносителей [4; 5].

Применение композита в силовых конструкциях вызвало много проблем в области проектирования, производства и обработки их прочности.

✉ mikhaill.limonin@tsagi.ru

Кроме того, по сравнению с изотропными материалами, слоистые композиты имеют ряд особенностей как в области деформирования, так и в области механики разрушения, которые необходимо учитывать при проектировании силовых структур [6; 7].

Одним из основных этапов в процессе проектирования летательного аппарата является этап экспериментальных исследований прочности и устойчивости на конструктивно подобных образцах (КПО), в частности, фрагментах силовых панелей. По результатам испытаний КПО определяется реальная несущая способность основных силовых элементов и формируются соответствующие критерии разрушения, необходимые для оценки прочности конструкции. При предельных нагрузках в стрингерных панелях могут проявляться нелинейные эффекты, такие как местная потеря устойчивости обшивки и стрингеров. Это говорит о том, что необходимо использовать нелинейные методы расчета несущей способности панелей [8–10]. Кроме того, при проведении испытаний КПО часто возникают вопросы, насколько условия эксперимента отражают реальную работу исследуемого образца в составе конструкции и как это влияет на оценку его несущей способности. Эти вопросы рассмотрены в первой части работы на примере моделирования эксперимента по испытаниям композиционной панели на сдвиг.

Вторая часть работы посвящена исследованию прочности и устойчивости металло-композитного узла навески подвижного агрегата, который является типовым элементом и содержит многорядные болтовые соединения. Как правило, соединения представляют собой наиболее критичные места конструкции; по этой причине эффективность конструкции в значительной степени зависит от результатов их проектирования. Эта

проблема стала еще более актуальной в металло-композитных соединениях, так как максимальная их эффективность, по данным работы [11], в лучшем случае составляет 40–50 %, а в худшем случае – значительно меньше. Для металлов эта цифра достигает величины в 70–80 %, т. е. эффективность композитов по сравнению с металлами значительно ниже. Для решения проблемы соединений в Европе была разработана программа BOJCAS (Bolted Joints in Composite Aircraft Structures) [11; 12], в которой участвуют специалисты Великобритании (Airbus UK), Германии (EADS), Швеции (SAAB), и ряда других стран. Основная задача программы – разработка и валидация новых методов расчета соединений, а также выработка критериев прочности, которые помогли бы расчетчику надежно прогнозировать прочность многоболтовых металло-композитных соединений.

1. Анализ закритического деформирования подкрепленных композиционных панелей

В качестве объектов для расчетных исследований прочности и закритического деформирования рассматривается стрингерная панель из слоистых полимерных композиционных материалов, предназначенная для проведения испытаний на сдвиг.

Обшивка панели толщиной 2,25 мм подкреплена четырьмя стрингерами таврового сечения толщиной 2,75 мм. Рабочая часть панели имеет размеры 612×612 мм, высота стрингера – 45 мм, шаг стрингеров – 153 мм. Материал панели – углепластик. Типовой пакет обшивки содержал 18 монослоев, а стрингера – 22 монослоя различной ориентации. На рис. 1 приведены основные геометрические параметры панели.



Рис. 1. Геометрические параметры панели

Как правило, характеристики прочности и устойчивости панели на сдвиг определяются испытаниями в сдвиговой рамке (жесткий шарнирный четырехзвенник). При испытаниях рамка растягивается вдоль одной из ее диагоналей, при этом в испытуемом образце возникает напряженно-деформированное состояние, соответствующее чистому сдвигу [6; 9; 10; 13]. Сдвиговая рамка выполнена из стальных пластин толщиной 10 мм. Пластины были соединены втулками диаметром

40 мм, обеспечивающими шарниры в углах рамки. Образец панели фиксировался в рамке двухрядным болтовым соединением с шагом 42 мм. Болты имели диаметр 6 мм. На каждое ребро рамки приходилось 28 болтов крепления образца.

Расчетные исследования по влиянию условий эксперимента на характеристики прочности и устойчивости панели при сдвиге выполнялись в программном комплексе NASTRAN. Анализ устойчивости проводился в линейной и нелиней-

ной постановке задачи. Была разработана конечно-элементная модель (КЭ модель) панели и сдвиговой рамки (рис. 2а). Характерный размер расчетной узловой сетки данной КЭ модели равен 5 мм. Общая размерность модели составила 80935 узлов расчетной сетки, 77660 плоских элементов, 240 балочных и 16 элементов связи, реализующих дополнительные кинематические зависимости в угловых шарнирах сдвиговой рамки. Моделирование обшивки и стрингеров панели осуществлялось изгибно-мембранными конечными элементами с послойным описанием структуры композиционного пакета. Такое моделирование дает возможность выполнять полноценный анализ прочности панели на основе известных характеристик монослоев и заданных критериев разрушения.

В целях сравнительного анализа были рассмотрены два варианта граничных условий. В первом случае рассматривалась панель в сдвиговой рамке, при этом реализовывались граничные условия, определяемые закреплением ее контура в эксперименте. Нагружение панели производилось сосредоточенным усилием P , приложенным к одному из угловых шарниров, диагонально противоположный узел закреплялся от линейных перемещений (рис. 2а). Во втором случае рассматривалась панель шарнирно опертая по кромкам целевой зоны размером 612×612 мм. Такие граничные условия более характерны реальной работе панели в составе конструкции. Дополнительные кинематические зависимости на контуре панели обеспечивали прямолинейность ее кромок. Панель нагружалась погонными сдвигающими усилиями N_{xy} , приложенными по контуру панели (рис. 2б).

На рис. 3 показаны местные формы потери устойчивости обшивки, полученные в линейном расчете, для панели в сдвиговой рамке (а) и при шарнирном ее закреплении (б). Происходит местная потеря устойчивости обшивки панели по двум косым полуволнам между стрингерами. Получены следующие критические усилия местной потери устойчивости обшивки: $N_{xy}^{кр} = 340$ Н/мм – для панели в рамке, $N_{xy}^{кр} = 320$ Н/мм – для шарнирно опертой панели. В данном случае, влияние условий эксперимента привело к увеличению критического усилия на ~6 %. Анализ величины действующих напряжений в панели показал, что прочность композита при этой нагрузке далеко не исчерпывается. В связи с этим были проведены нелинейные расчеты панелей с целью рассмотрения их закритического деформирования и определения величин разрушающих нагрузок.

В нелинейной постановке задача решалась итерационным методом Ньютона-Рафсона. Проведен анализ нелинейных откликов конструкции на прикладываемую нагрузку. Для панели в сдвиговой рамке под нелинейным откликом конструкции рассматривалась зависимость перемещения точки нагружения вдоль диагонали (рис. 4а) от уровня приложенной нагрузки:

$$N_{xy} = \frac{P}{\sqrt{2}b},$$

где P – приложенное усилие; b – размер рамки, а для панели без рамки – перемещения одной из угловых точек панели (рис. 4б). Эти графики дают наглядное представление об изменении сдвиговой жесткости панели в процессе ее нагружения.

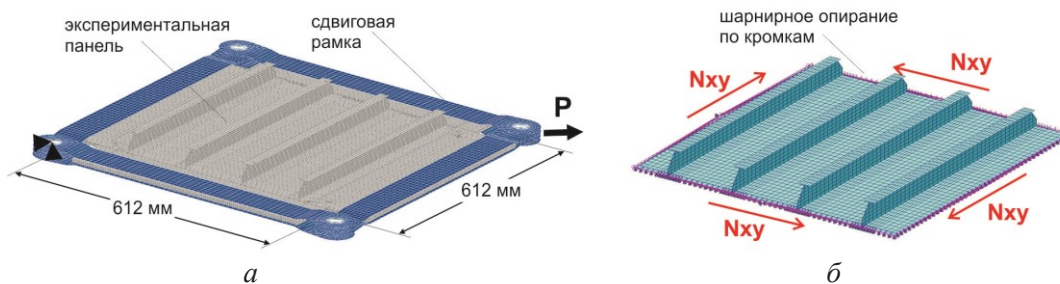


Рис. 2. Расчетные модели панелей: а – панель в сдвиговой рамке; б – шарнирно опертая панель

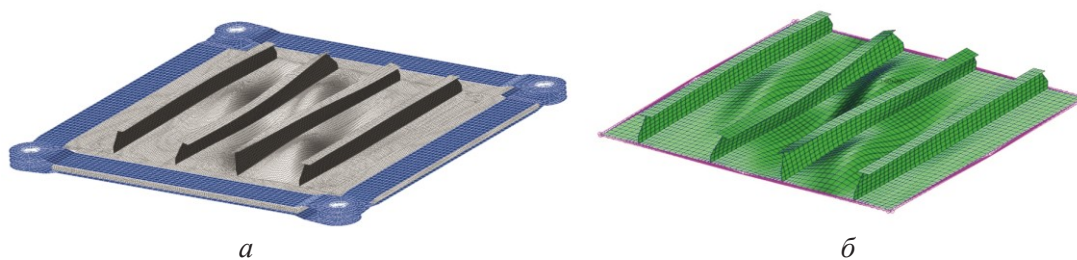


Рис. 3. Формы потери устойчивости обшивки: а – панель в сдвиговой рамке; б – шарнирно опертая панель

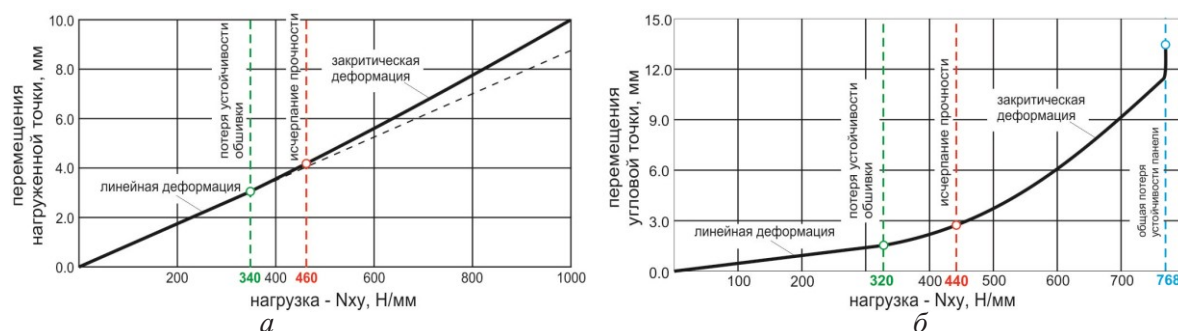


Рис. 4. Нелинейные отклики конструкции на прикладываемую нагрузку:
а – панель в сдвиговой рамке; б – шарнирно опертая панель

Для шарнирно опертая панели при нагрузке $N_{xy}^{мпу} = 320$ Н/мм имеет место излом графика (рис. 4б), что соответствует усилию местной потери устойчивости обшивки. При $N_{xy}^{опу} = 768$ Н/мм происходит резкий рост перемещений, что свидетельствует об исчерпании несущей способности панели в результате общей потери устойчивости. Для панели в сдвиговой рамке (рис. 4а) местная потеря устойчивости соответствует нагрузке 340 Н/мм, где также происходит излом графика. Далее, вплоть до нагрузки $N_{xy} = 1000$ Н/мм, других переломов и резкого роста перемещений на графике не наблюдается, что свидетельствует об отсутствии общей потери устойчивости. В дальнейшем расчет при более высоком уровне действующей нагрузки показал, что общая потеря устойчивости панели в сдвиговой рамке реализуется при нагрузке 1220 Н/мм, что более чем в 1,5 раза больше, чем для панели без сдвиговой рамки. Полученные результаты показывают, что влияние условий эксперимента на оценку общей устойчивости панели может быть значительным. При моделировании

панели без рамки граничные условия соответствуют ее шарнирному опиранию, а жесткая сдвиговая рамка реализует условия, близкие к защемлению. Для панелей, спроектированных по условиям общей потери устойчивости, а не по условиям прочности, учет этого факта весьма важен.

Моделирование экспериментальной рамки позволило оценить уровень напряжений в ее конструкции и болтах крепления панели. На рис. 5а показано, что при нагрузке $N_{xy} = 320$ Н/мм максимальный уровень напряжений наблюдается в проушинах, и их величина достигает значения 330 МПа. Максимальные перерезывающие силы $R_{болт}^{max} = 8981$ Н возникают в болтах вблизи узлов нагружения, что соответствует уровню эквивалентных напряжений в болте 275 МПа. Такие величины напряжений не являются критичными для элементов, выполненных из стали. Очевидно, что прочность в болтовом соединении рамки с панелью будет ограничиваться характеристиками на смятие композиционной обшивки, усиленной накладками.

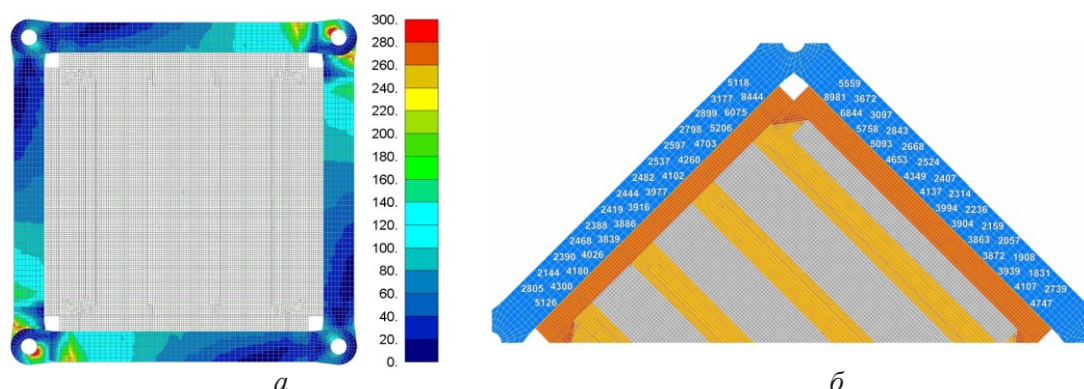


Рис. 5. Напряженное состояние сдвигой рамки (а) и усилия в болтах крепления панели (б)

На основе результатов нелинейного расчета проведен анализ прочности панели. Для оценки прочности панели в качестве критерия разрушения использовался критерий Цая-Хилла [14]. Этот критерий является наиболее распространенным при расчетах прочности слоистых композитов

и дает консервативную оценку [6]. Для панели в сдвиговой рамке процесс разрушения, т. е. выполнение критерия Цая-Хилла, начинается при нагрузке $N_{xy}^{Хилл} = 420$ Н/мм в небольшой области сопряжения обшивки и стрингера. При уровне нагрузки $N_{xy}^{Хилл} = 460$ Н/мм выполнение критерия

происходило также в пиках образовавшихся волн потери устойчивости обшивки и в значительной области панели. Это свидетельствовало о многочисленных повреждениях монослоев обшивки, ее разрушению и исчерпанию несущей способности

панели. Для панели без рамки разрушающая нагрузка соответствовала $N_{xy}^{хилл} = 440$ Н/мм. На рис. 6 показано распределение зон повреждения композита (красный цвет) при нагрузках 420 Н/мм (рис. 6а) и 460 Н/мм (рис. 6б) соответственно.

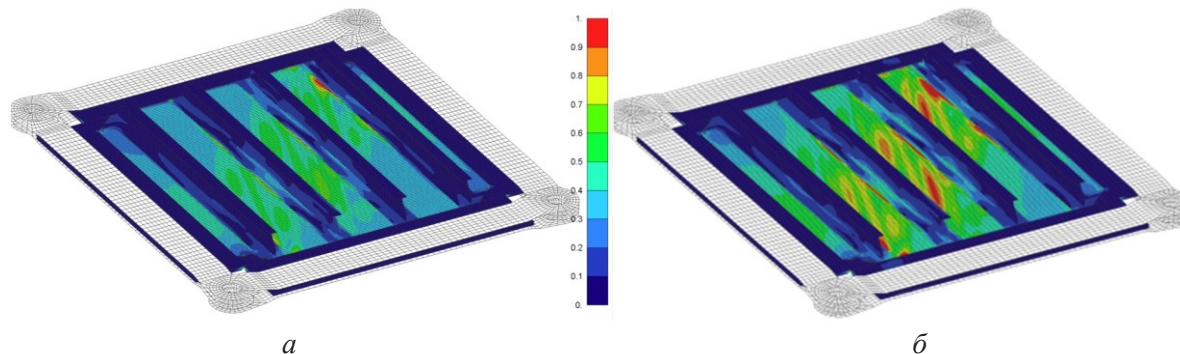


Рис. 6. Распределение зон повреждения композита при закритическом деформировании панели в сдвиговой рамке

Следует также отметить, что разрушение панели происходило в закритической области ее деформирования. В линейной постановке задачи, когда потеря устойчивости обшивки не учитывалась, величина нагрузки разрушения панели по условиям прочности составляла 640 Н/мм. Очевидно, что расчетная оценка прочности данной панели на основе линейного анализа может приводить к неверному результату и завышению ее несущей способности. По результатам испытаний панели на сдвиг спрогнозированная нагрузка потери устойчивости обшивки отличалась от экспериментально полученной менее чем на 1 %, а нагрузка разрушения – менее чем на 5 %.

Результаты проведенных исследований дают возможность сделать некоторые выводы. Испытания фрагментов панелей в сдвиговой рамке дают корректные оценки критических напряжений ее местной потери устойчивости и прочности при закритическом деформировании, однако оценка критических напряжений общей потери устойчивости не всегда может оказаться корректной. Последнее связано не только с отличием граничных условий, реализуемых в сдвиговой рамке и в реальных условиях нагружения панели, но и с ограниченными размерами испытуемого фрагмента, при которых длина волны общей потери устойчивости не может реализоваться в полной мере.

2. Анализ прочности металло-композитного соединения

Соединение (рис. 7) состоит из двух скошенных титановых втулок 2 и 3, которые с помощью двух хвостовых пластин через алюминиевые накладки 4 и 5 крепятся болтами к композитному ламинату 1.

Расчеты соединения проведены в программном комплексе ABAQUS, КЭ модель соединения (рис. 7) включает 499445 узлов с 1019379 неизвестными перемещениями. Для моделирования деталей соединения применялись объемные шестиузловые и восьмиузловые элементы с линейной аппроксимацией перемещений с учетом контактного взаимодействия деталей. Для лучшей сходимости решения использована опция контроля контакта с автоматической стабилизацией (коэффициент трения между деталями $f = 10^{-4}$).

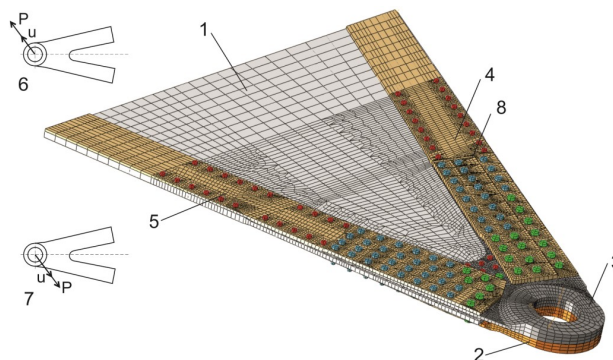


Рис. 7. КЭ модель соединения (6, 7 – случаи нагружения; 8 – зона окончания хвостовика проушин)

Модель закреплялась по торцам деталей 1, 4 и 5. Рассматривались два случая нагружения, которые условно назовем растяжением (6 на рис. 7) и сжатием (7 на рис. 7). В обоих случаях нагружения нагрузка на проушины деталей 2 и 3 передается через точку в центре проушин и специальные кинематические контактные пары, позволяющие свободно перемещаться только в направлении нагружения.

Интегральные механические характеристики многослойного композиционного пакета дета-

ли 1 были получены по методике, приведенной в работе [15]. Расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) проводился с учетом как геометрической, так и физической нелинейности металлических деталей соединения. Для материалов из титанового и дюралевого сплавов учет их работы в упругопластической области выполнялся на основе задания реальных диаграмм напряжений от деформаций « σ – ε ».

Расчетный анализ представляет собой итерационную пошаговую процедуру, при которой перемещения центра узла на каждом шаге получают малые приращения. При этом постепенно возрастает нагрузка, приложенная к узлу. Предполагалось, что композит в процессе нагружения узла не разрушается и сохраняет свои жесткостные свойства вплоть до падения нагрузки после достижения ею своего предельного значения.

На рис. 8 приводится зависимость нагрузки P от перемещения центра проушины u . Как следует из рисунка, в случае сжатия нагрузка P до величины перемещения $u \approx 2$ мм увеличивается практически линейно, и при достижении значения 590 кН происходит общая потеря устойчивости деталей соединения. Инициатором потери устойчивости композитной пластины являются хвостовики титановых проушин (8 на рис. 7), сильно меняющие в зонах своего окончания жесткостные свойства соединения. При растяжении соединения, с увеличением нагрузки из-за нелинейности свойств металла, возникают большие деформации в зоне сопряжения проушин с их более тонкими хвостовиками, и при нагрузке 3670 кН начинается процесс разрушения детали.

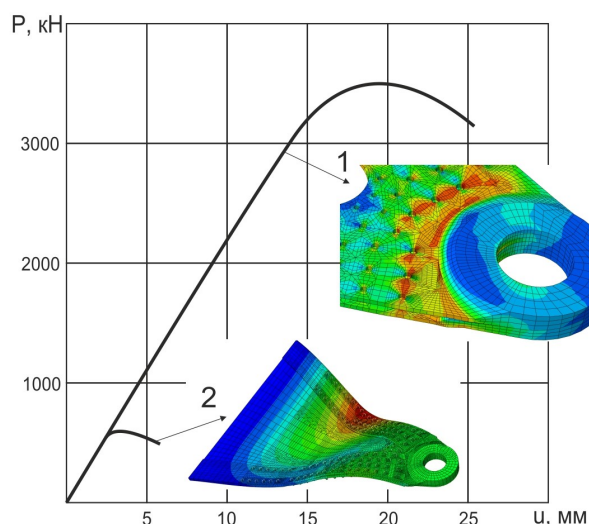


Рис. 8. Зависимость нагрузки P от перемещения центра проушины u (1 – растяжение соединения, 2 – сжатие соединения)

Для оценки прочности композитного ламината воспользуемся критерием Нуизмера [16; 17]. Согласно этому критерию, разрушение детали

с отверстием происходит тогда, когда напряжение на некотором характеристическом расстоянии r_0 от контура отверстия достигнет разрушающего значения σ_p , определяемого выражением:

$$\sigma_p = \frac{\sigma_b}{K_d},$$

где σ_b – предел прочности материала, K_d – коэффициент концентрации напряжений на расстоянии r_0 от контура отверстия.

Для определения характеристического расстояния воспользуемся экспериментальными данными по разрушению пластинок без отверстия и с заполненным отверстием, полученными по методикам ASTM D 6742 [18]. Разрушение пластинок без отверстия произошло при напряжении 1010 МПа, а разрушение подобной пластины с заполненным болтом отверстием (рис. 9а) произошло при напряжении 522 МПа. Таким образом, отверстие в пластине снизило ее прочность в $K_d = 1010 / 522 = 1,93$ раза. Методом конечных элементов проведен расчет квадратной пластинки с отверстием, заполненным титановой шайбой (рис. 9б).

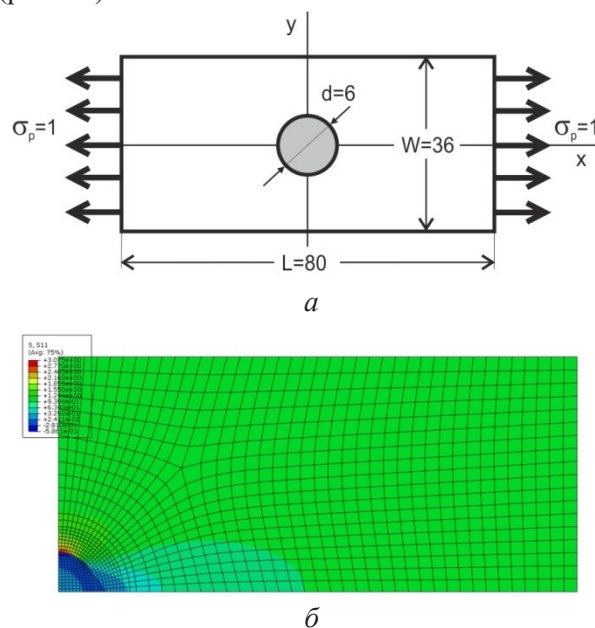


Рис. 9. Схема плоского образца с заполненным отверстием (а) и распределение максимальных главных напряжений (б)

Для вычисления r_0 была построена эпюра напряжений в нетто-сечении пластины $x = 0$ (рис. 10), и по значению коэффициента 1,93, полученному по экспериментальным данным, определено характеристическое расстояние $r_0 = 0,74$ мм.

Анализ напряженно-деформированного состояния соединения показал, что максимальные нормальные напряжения сосредоточены по контуру болта в зоне окончания хвостовика проушин (8 на рис. 7). Используя данные расчета в этой

зоне, по критерию Нуизмера прочность композита оценена в 1247 кН.

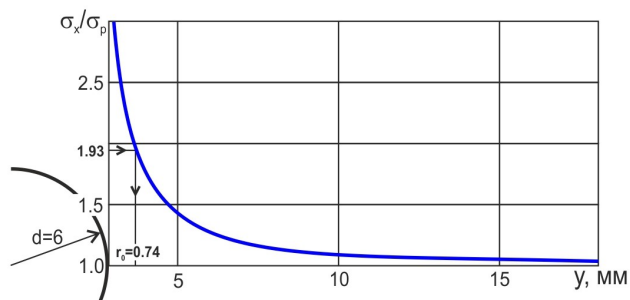


Рис. 10. Эпюра для определения характеристического размера r_0

Из анализа результатов расчета соединения следует, что несущая способность соединения при его растяжении ($P = 1247$ кН) значительно отличается от несущей способности соединения при его сжатии ($P = 590$ кН). Также можно отметить, что металлические части соединения разрушаются при нагрузке, которая примерно в три раза превышает нагрузку разрушения композиционной детали. Наиболее простым способом повышения прочности соединения при его растяжении является замена алюминиевого сплава материала накладок (3 и 4 на рис. 6) титановым сплавом, что приведет к снижению напряжений в композите.

Если же сделать на этих деталях внешние отбортовки на четвертую часть их ширины, то можно будет повысить и разрушающую нагрузку при сжатии соединения. В дальнейшем, при экспериментальной отработке, проведенные численные исследования позволили избежать преждевременных разрушений при испытаниях соединений на прочность.

Заключение

Представленные в работе исследования еще раз показывают эффективность применения современных расчетных методов в задачах оценки прочности элементов конструкций из композиционных материалов. Они дают возможность осуществлять моделирование сложных объектов, как в геометрическом плане, так и по их физическому содержанию. Виртуальная модель эксперимента позволяет рассматривать испытуемый объект, а также элементы нагружающих устройств и оснастки, используемых при испытаниях. Расчетное сопровождение экспериментальных работ с использованием методов виртуального моделирования является основой не только для валидации расчетных моделей, но и для прогнозирования условий работы объекта испытаний в системе конструкции.

Список литературы

- [1] Irving P. E., Soutis C. Polymer Composites in the Aerospace Industry (Second Editions) // Woodhead Publishing. 2019. 688 p.
- [2] Соломонов Ю. С., Георгиевский В. П., Недбай А. Я., Андрющин В. А. Прикладные задачи механики композитных цилиндрических оболочек. М. : Физматлит, 2014. 408 с.
- [3] Замула Г. Н., Колесник К. А. Способы повышения весовой эффективности применения композиционных конструкций // Полет. 2018. № 10. С. 14–24.
- [4] Васильев В. В., Барынин В. А., Разин А. Ф., Петроковский С. А., Халиманович В. И. Анизотридные композитные сетчатые конструкции – разработка и приложение к космической технике // Композиты и наноструктуры. 2009. № 3. С. 38–50.
- [5] Бахвалов Ю. О., Петроковский С. А., Полиновский В. П., Бахтин А. Г., Разин А. Ф. Особенности проектирования композитных сетчатых отсеков, связанные с условиями их нагружения // Конструкции из композиционных материалов. 2009. № 4. С. 34–43.
- [6] Гришин В. И., Дзюба А. С., Дударьков Ю. И. Прочность и устойчивость элементов и соединений авиационных конструкций из композитов. М. : Физматлит, 2013. 272 с.
- [7] Дударьков Ю. И., Левченко Е. А., Лимонин М. В. Влияние структуры пакета на краевые эффекты в слоистых композитах // Исследования наукограда. 2014. № 3 (9). С. 25–30.
- [8] Думанский А. М., Таирова Л. П., Горлач И., Алимова М. А. Расчетно-экспериментальные исследования нелинейных свойств углепластиков // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2011. № 5. С. 91–97.
- [9] Дударьков Ю. И., Левченко Е. А., Лимонин М. В. Некоторые особенности оценки несущей способности стрингерных панелей из ПКМ // Механика композиционных материалов и конструкций. 2019. Т. 25. № 2. С. 192–206.
- [10] Дударьков Ю. И., Лимонин М. В., Наумов С. М. Расчетно-экспериментальные исследования закритического деформирования пластин с использованием нелинейного МКЭ // Труды ЦАГИ. Вып. 2698. 2011. С. 70–81.
- [11] McCarthy M. A. BOJCS: Bolted Joints in Composite Aircraft Structures // Air&Space Europe. 2001. vol. 3. no. 3/4. pp. 21–28.
- [12] McCarthy C. T., McCarthy M. A., Gilchrist M. D. Predicting Failure in Multi-Bolt Composite Joints Using Finite Element Analysis and Bearing-Bypass Diagrams // Key Engineering Materials. 2005. vol. 293–294, pp. 591–598.

- [13] Полилов А. Н., Татусь Н. А. Биомеханика прочности волокнистых композитов. М. : Физматлит, 2018. 328 с.
- [14] Tsai S. W. Strength theories of filamentary structures // Schwartz R. T., Schwartz H. S. (Eds.) Fundamental aspects of fiber reinforced plastic composites. New York. Wiley Interscience. 1968. pp. 3–11.
- [15] Сироткин О. С., Гришин В. И., Литвинов В. Б. Проектирование, расчет и технология соединений авиационной техники. М. : Машиностроение, 2006. 330 с.
- [16] Боровская Я. С., Глебова М. А., Гришин В. И., Гусева Н. В. Оценка прочности металло-композитных соединений с применением критерия Нуизмера // Ученые записки ЦАГИ. 2018. Т. XLIX. № 2. С. 84–92.
- [17] Беспалов В. А., Гоцелюк Т. Б., Гришин В. И., Качарава И. Н. О применении модифицированного критерия Нуизмера к расчету прочности металло-композитных соединений // Механика композиционных материалов и конструкций. 2013. Т. 19. № 1. С. 14–34.
- [18] ASTM D6742/D6742M-12: Standard Practice for Filled-Hole Tension and Compression Testing of Polymer Matrix Composite Laminates // West Conshohocken. ASTM International. 2012.

STRENGTH ANALYSIS OF STRUCTURAL ELEMENTS AND METAL-COMPOSITE JOINTS OF A FLYING VEHICLE

**V. I. Grishin, M. A. Glebova, Yu. I. Dudarkov,
E. A. Levchenko, M. V. Limonin**

*The Central Aerohydrodynamic Institute named after N. E. Zhukovsky,
Zhukovsky, Moscow region, Russian Federation*

The strength and load-bearing capacity analyses results for flying vehicle typical structural elements and joints are presented in the paper. Calculations were made with the use of non-linear finite element method, implemented in software NASTRAN and ABAQUS. Structural composite panels and metal-composite joints in attachment points of moving components under consideration for research. Employed computational models and procedures, obtained results analysis process are presented. Numerical strength estimations of structural panels and joint strength confirmed with test results. On the example of a virtual test simulation of composite panels' strength test in a shear frame, the effect of experimental conditions on obtaining results is evaluated. It is shown that boundary conditions realized in such tests cannot always give correct values of panels' global buckling critical stress. The computation results of buckling and strength of metal-composite joints in attachment points of moving components are presented. The computation performed on a detailed model with employing solid elements and taking into account contact interaction between joint parts, geometrical and physical non-linearities. Composite strength in bolted joints is made based on Nuismer criterion. The formed recommendations for improvement made it possible to avoid earlier failure of the considered joint in strength tests.

Keywords: composite panel, metal-composite joint, analysis model, strength criterion, buckling, test results, failure load.

References

- [1] Irving P. E., Soutis C. Polymer Composites in the Aerospace Industry (Second Editions) // Woodhead Publishing, 2019, 688 p.
- [2] Solomonov Yu. S., Georgiyevskiy V. P., Nedbay A. Ya., Andryushin V. A. *Prikladnyye zadachi mekhaniki kompozitnykh tsilindricheskikh obolochek* [Applied problems of mechanics of composite cylindrical shells]. Moscow, Fizmatlit, 2014, 408 p. (In Russian)
- [3] Zamula G. N., Kolesnik K. A. *Sposoby povysheniya vesovoy effektivnosti primeneniya kompozitsionnykh konstruktsiy* [Weight saving technique for composite structures] // Polyot, 2018, no. 10, pp. 14–24. (In Russian)

- [4] Vasil'ev V. V., Barynin V. A., Razin A. F., Petrokovskii S. A., Khalimanovich V. I. *Anizogridnyye kompozitnyye setchatyye konstruksii – razrabotka i prilozheniye k kosmicheskoy tekhnike* [Anisogrid composite lattice structures – development and aerospace application] // Composites and Nanostructures, 2009, no. 3, pp. 38–50. (In Russian)
- [5] Bakhvalov Yu. J., Petrokovskiy S. A., Polinovskiy V. P., Bakhtin A. G. *Osobennosti proyektirovaniya kompozitnykh setchatykh otsekov, svyazannyye s usloviyami ikh nagruzheniya* [Peculiarities of designing of composite lattice compartments explained by their loading conditions] // Composite materials constructions, 2009, no. 4, pp. 34–43. (In Russian)
- [6] Grishin V. I., Dzuba A. S., Dudarkov Yu. I. *Prochnost i ustoychivost elementov i soyedineniy aviatsionnykh konstruksiy iz kompozitov* [The strength and buckling of elements and fittings of composite aircraft structures]. Moscow, Fizmatlit, 2013, 272 p. (In Russian)
- [7] Dudarkov Yu. I., Levchenko E. A., Limonin M. V. *Vliyaniye struktury paketa na krayevyye efekty v sloistnykh kompozitakh* [The influence of laminate stacking sequence on layered composites edge effect] // The Research of the Science City, 2014, no. 3 (9), pp. 25–30. (In Russian)
- [8] Dumansky A. M., Tairova L. P., Gorchach I., Alimov M. A. *Raschetno-eksperimentalnyye issledovaniya nelineynykh svoystv ugleplastikov* [A design-experiment study of nonlinear properties coal-plastic] // J. Mach. Manuf., Reliab. 2011, no. 5, pp. 91–97. (In Russian)
- [9] Dudarkov Yu. I., Levchenko E. A., Limonin M. V. *Nekotoryye osobennosti otsenki nesushchey sposobnosti stringernykh paneley iz PKM* [Some feature of CFRP stringer Panels Load Bearing Capacity estimation] // Mechanics of Composite Materials and Structures, 2019, vol. 25, no. 2, pp. 192–206. (In Russian)
- [10] Dudarkov Yu. I., Limonin M. V., Naumov S. M. *Raschetno-eksperimental'noye issledovanie zakriticheskogo deformirovaniya plastin s ispol'zovaniem nelineynogo MKE* [Numerical and experimental study of the postbuckling deformation of the plates by the means of non-linear FE method] // Trudy TsAGI, 2011, issue 2698, pp. 70–81. (In Russian)
- [11] McCarthy M. A. BOJCAS: Bolted Joints in Composite Aircraft Structures // Air&Space Europe, 2001, vol. 3, no. 3/4, pp. 21–28.
- [12] McCarthy C. T., McCarthy M. A., Gilchrist M. D. Predicting Failure in Multi-Bolt Composite Joints Using Finite Element Analysis and Bearing-Bypass Diagrams // Key Engineering Materials, 2005, vol. 293–294, pp. 591–598.
- [13] Polilov A. N., Tatus' N. A. *Biomekhanika prochnosti volknistykh kompozitov* [Strength Biomechanics of fibrous composites]. Moscow, Fizmatlit, 2018, 328 p. (In Russian)
- [14] Tsai S. W. Strength theories of filamentary structures // Schwartz R. T., Schwartz H. S. (Eds.). *Fundamental aspects of fiber reinforced plastic composites*, New York, Wiley Interscience, 1968, pp. 3–11.
- [15] Sirotkin O. S., Grishin V. I., Litvinov V. B. *Proektirovaniye, raschet i tekhnologiya soedinenii avia-tsionnoitekhniki* [Design, calculation and technology of aircraft connections]. Moscow, Mashinostroyeniye, 2006, 330 p. (In Russian)
- [16] Borovskaya Ya. S., Glebova M. A., Grishin V. I., Guseva N. V. *Otsenka prochnosti metallo-kompozitnykh soyedineniy s primeneniyyem kriteriya Nuismera* [Estimation of the strength of metal-composite joints using the Nuismer criterion] // TsAGI Science Journal, 2018, vol. XLIX, no. 2, pp. 84–92. (In Russian)
- [17] Grishin V. I., Kacharava I. N., Bespalov V. A., Gotseljuk T. B. *O primeneniyye modifitsirovannogo kriteriya Nuismera k raschetu prochnosti metallo-kompozitnykh soyedineniy* [About application of modified Nuismer criterion to analysis of strength of metal-composite joints] // Mechanics of Composite Materials and Structures, 2013, vol. 19, no. 1, pp. 14–34. (In Russian)
- [18] ASTM D6742/D6742M-12: Standard Practice for Filled-Hole Tension and Compression Testing of Polymer Matrix Composite Laminates // West Conshohocken, ASTM International, 2012.

Сведения об авторах

Глебова Мария Александровна – ведущий инженер ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского». Окончила Московский энергетический институт в 2012 году. Область научных интересов: механика деформируемого тела, численные методы оценки прочности металло-композитных соединений.

ORCID: 0000-0002-6182-5546

Гришин Вячеслав Иванович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского». Окончил Самарский (Куйбышевский) авиационный институт в 1965 году. Область научных интересов: механика деформируемого тела, прочность конструкций и металло-композитных соединений.

ORCID: 0000-0002-2846-2843

Дударьков Юрий Иванович – кандидат технических наук, начальник отдела ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского». Окончил Московский энергетический институт в 1970 году. Область научных интересов: механика деформируемого тела, численные методы оценки общей прочности и устойчивости конструкций летательного аппарата.

ORCID: 0000-0003-2676-0094

Левченко Евгений Александрович – начальник сектора ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского». Окончил Московский физико-технический институт в 2012 году. Область научных интересов: механика деформируемого тела, численные методы оценки прочности конструкций из композиционных материалов.

ORCID: 0000-0003-0485-871X

Лимонин Михаил Валерьевич – кандидат технических наук, заместитель начальника отделения ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского». Окончил Московский авиационный институт в 2000 году. Область научных интересов: механика деформируемого тела, статическая прочность конструкций летательного аппарата.

ORCID: 0000-0003-0702-1771

СТЕНД ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРАВЛЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕНН СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ

А. Б. Гладышев¹ ✉, Д. Д. Дмитриев¹, В. Н. Ратушняк¹,
А. В. Жгун¹, О. Б. Грицан²

¹ Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск, Российская Федерация

² АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва,
г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация

Перспективным решением для предоставления услуг связи и передачи данных на территории Крайнего Севера является развитие телекоммуникационной сети на основе спутниковых систем связи. Поэтому задача разработки и создания земных станций перспективных систем спутниковой связи, имеющих характеристики, значительно превышающие мировые аналоги, является актуальной. Характеристики таких станций во многом зависят от характеристик антенных систем, которые определяют энергетические характеристики канала связи. Целью работы является разработка стенда для измерения направленных характеристик антенн спутниковых систем связи на базе сферического сканера TS8991. Спиральное сканирование, в отличие от классического сферического сканирования, представляет собой альтернативный метод измерений, направленный на уменьшение времени измерений при сохранении необходимой точности. В результате данной работы был реализован алгоритм спирального сканирования на основе сканера ближнего поля фирмы Rohde & Schwarz TS8991 и построен стенд для контроля и настройки параметров антенн земной станции спутниковой связи, представлена его структурная схема. На разработанном стенде была подвергнута испытаниям антенна с рефлектором диаметром 1,2 м. Результаты измерений показали отклонения измеренных значений от расчетных, обусловленные конструктивными недостатками антенны. Время измерений и преобразований в дальнейшем поле для антенны с диаметром рефлектора 1,2 м с помощью такого стенда составило 35 минут.

Ключевые слова: спутниковая система связи, измерение параметров антенны, плоский сканер, цилиндрический сканер, сферический сканер.

Введение

Освоение Арктического региона, на сегодняшний день, приобретает особую значимость для национальных интересов России. Однако полно-

ценное развитие труднодоступных северных регионов возможно при обеспечении данного региона достаточно развитой системой связи.

Развитие телекоммуникаций в Арктике, основанное на использовании традиционных наземных сетей связи, характеризуется некоторыми трудностями, выраженными в следующих факторах:

- низкая плотность населения;
- слабое развитие инфраструктуры, транспортных путей и линий связи;
- большая площадь охватываемой территории;
- сложные климатические условия.

Разрешение этих трудностей является сложной, а иногда и не разрешимой задачей.

Сложившаяся ситуация делает актуальным вопрос развития систем спутниковой связи для обеспечения телекоммуникационными услугами

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в ходе реализации комплексного проекта «Создание высокотехнологичного производства земных станций перспективных систем спутниковой связи для обеспечения связанности труднодоступных, северных и Арктических территорий Российской Федерации», осуществляемого при участии Сибирского федерального университета (соглашение № 075-11-2019-078 от 13.12.2019)

✉ a-qlonass@yandex.ru

© Ассоциация «ТП «НИСС», 2020

территории труднодоступных, в том числе и северных, регионов нашей страны.

Использование возможностей зарубежных систем спутниковой связи при этом осложняется высокой стоимостью предоставляемых услуг, а также не достаточной зоной покрытия труднодоступных северных регионов России [1; 2].

Указанные факторы снижают возможности по применению зарубежных систем связи на территории России, поэтому задача создания и развития отечественной системы спутниковой связи является, несомненно, актуальной.

Из всего вышесказанного возникает новая задача по разработке и созданию непосредственно земных станций систем спутниковой связи (ЗССС), имеющих характеристики, значительно превышающие мировые аналоги [3].

Характеристики таких станций во многом зависят от характеристик антенных систем, которые определяют энергетические характеристики канала связи.

Для измерения параметров разрабатываемых антенн необходимо иметь соответствующий измерительный комплекс, позволяющий с высокой точностью определять эти параметры и по результатам измерений осуществлять дальнейшую настройку антенны при ее установке на изделие. В данной работе предлагается вариант стенда для контроля и настройки параметров антенн ЗССС.

Одним из важнейших элементов радиолинии «ЗССС – космический аппарат» является антенная система ЗССС. Ее энергетические характеристики напрямую определяют отношение сигнал-шум на входе приемника, а, следовательно, и вероятность битовой ошибки BER. Поэтому очень важно знать такие параметры антенной системы, как коэффициент усиления (КУ), коэффициент направленного действия (КНД), коэффициент полезного действия, шумовая температура и др. [4].

Существует два способа измерения направленных характеристик антенн – измерения в дальней и ближней зонах.

При измерениях в дальней зоне необходимое расстояние между испытуемой и вспомогательной антеннами определяется размерами их апертур и рабочей длиной волны. При обеспечении нужных расстояний электромагнитное поле, излучаемое вспомогательной антенной, можно считать плоской волной.

При измерениях в ближней зоне характеристики антенн находятся путем обработки результатов измерений ближнего поля. Ближнее поле антенны чаще всего измеряется на плоскости, расположенной перед антенной, с использованием двухкоординатных механизмов (сканеров) для перемещения измерительного зонда. Расстояние между антенной и зондом лежит в пределах от не-

скольких длин волн до нескольких размеров раскрыва антенны и всегда значительно меньше расстояния до границы дальней зоны.

В виду громоздкости системы измерения характеристик антенн в дальней зоне предпочтение было отдано разработке стенда на основе способа измерения поля в ближней зоне.

Суть способа измерения характеристик антенн в ближней зоне состоит в исследовании амплитудно-фазового распределения электромагнитного поля вблизи апертуры антенной системы и математического пересчета характеристик электромагнитного поля в дальней зоне [5].

Таким образом, используя способ ближнего поля, представляется возможность измерения таких характеристик антенных систем, как: амплитудные и фазовые диаграммы направленности (ДН), коэффициент эллиптичности и угол наклона поляризационного эллипса (в случае круговой поляризации), характеристики направленных свойств антенны.

Для измерения характера распределения электромагнитного поля в ближней зоне используют специально разработанные сканирующие устройства. Данные сканирующие устройства измеряют ближнее поле антенны либо вдоль плоской поверхности вблизи апертуры антенны (плоский сканер), либо вокруг антенны, но линейно в вертикальном направлении (цилиндрический сканер), либо описывая сферу, где центром этой сферы является исследуемая антенна (сферический сканер).

1. Плоский сканер

Плоский сканер используется для исследования антенн, все излучаемое поле которых сконцентрировано вблизи апертуры на некой поверхности, представляющей собой плоскость [6].

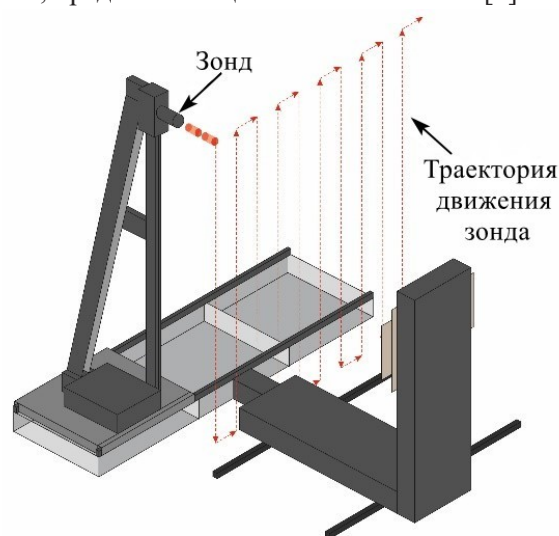


Рис. 1. Схематическое изображение плоского сканера

Сканирующее устройство измеряет характеристики ближнего поля, перемещая измерительный зонд вдоль этой плоскости на расстоянии $3...5\lambda$ от антенны, как показано на рис. 1.

Данный способ позволяет проводить измерение направленных свойств антенны в секторе до $\pm 70^\circ$.

2. Цилиндрический сканер

Цилиндрическое сканирование применяется для исследования направленных свойств антенн с широкой ДН в одной плоскости и узкой в другой. К таким антеннам относятся в основном зеркальные антенны, где в качестве рефлектора используется зеркало в виде усеченного параболоида.

При измерении параметров антенны с использованием цилиндрических сканеров исследуемая антенна размещается на азимутальном столе. Одновременно с линейным перемещением зонда в вертикальном направлении осуществляется вращение исследуемой антенны на азимутальном столе [7]. В результате область сканирования представляет собой цилиндрическую поверхность (рис. 2).

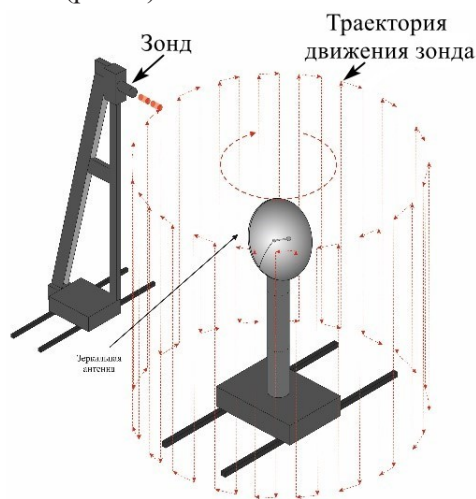


Рис. 2. Схема цилиндрического сканирования

При цилиндрическом сканировании антенн с «веерными» ДН из-за ограничения области сканирования в вертикальном направлении получить полную диаграмму можно только в азимутальной плоскости, но при этом ограниченную в угломестной плоскости.

3. Сферический сканер

Сферическое сканирование является универсальным способом сканирования антенн [8]. В то же время этот способ относится к наиболее сложным: во-первых, данный способ сканирования ведет к конструктивной сложности построения сканера, во-вторых, требует разработки слож-

ных алгоритмов обработки. Поэтому такой способ применяется тогда, когда нельзя обойтись плоским или цилиндрическим сканером. Схема сферического способа сканирования приведена на рис. 3.

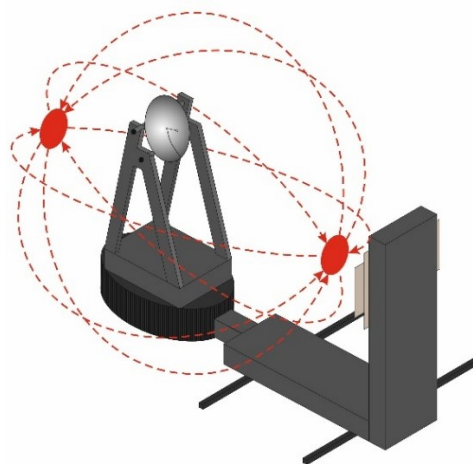


Рис. 3. Схема сферического сканирования

В основном, сферические сканеры используются для измерения характеристик слабонаправленных неапертурных антенн и антенн с малыми электрическими размерами.

Так как при осуществлении измерений на сферическом сканере ориентация вектора $\vec{E}$ измеряемой антенны постоянно меняется, то необходимо измерять две ортогональные компоненты поля: при вертикальном и при горизонтальном положении вектора $\vec{E}$ линейно-поляризованного зонда.

4. Измерение методом спирального сканирования на сферическом сканере

Спиральное сканирование представляет собой альтернативный метод измерений, направленный на уменьшение времени измерений при сохранении необходимой точности.

В отличие от классического сферического сканирования (рис. 4а), при спиральном сканировании точки измерений образуют собой спираль, описанную вокруг измеряемой антенны (рис. 4б).

По результатам измерений эквивалентные поверхностные токи пересчитываются в ДН дальней зоны. Алгоритм расчета, при этом, должен поддерживать полную коррекцию на пробник, а также коррекцию на отражения от металлического пола для полубезэховых камер. Необходимым условием при измерении является прием показаний от внешнего измерителя геометрии в реальном времени.

В результате данной работы был реализован алгоритм спирального сканирования на основе сканера ближнего поля фирмы Rohde & Schwarz TS8991 [9; 10] и построен стенд для контроля и на-

стройки параметров антенн ЗССС, структурная схема которого представлена на рис. 5.

Принцип действия стенда для контроля и настройки параметров антенн ЗССС основан на измерении амплитудно-фазового распределения (АФР) напряженности электромагнит-

ного поля в ближней зоне антенны. Измерения АФР проводятся с помощью векторного анализатора цепей Rohde & Schwarz ZVA50, один порт которого подключен к излучающей антенне, а второй порт – к приемной, при этом система является двунаправленной.

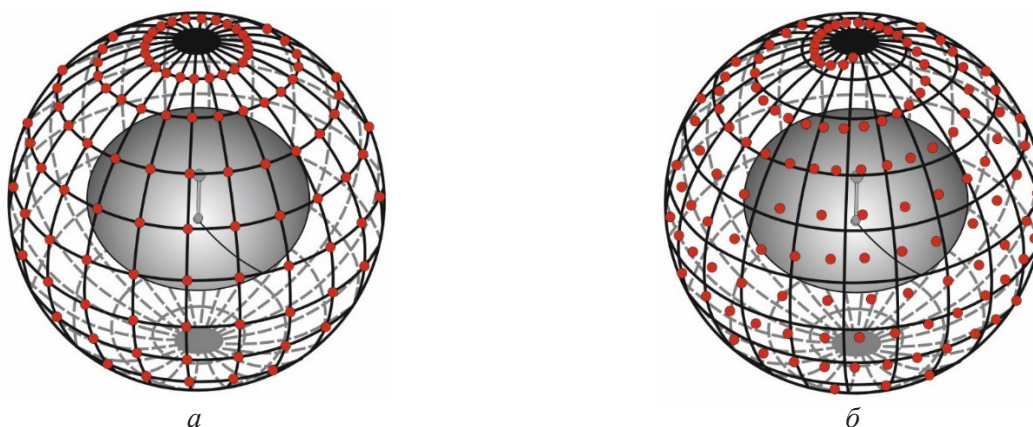


Рис. 4. Точки классического сферического сканирования (а) и спирального сканирования (б)

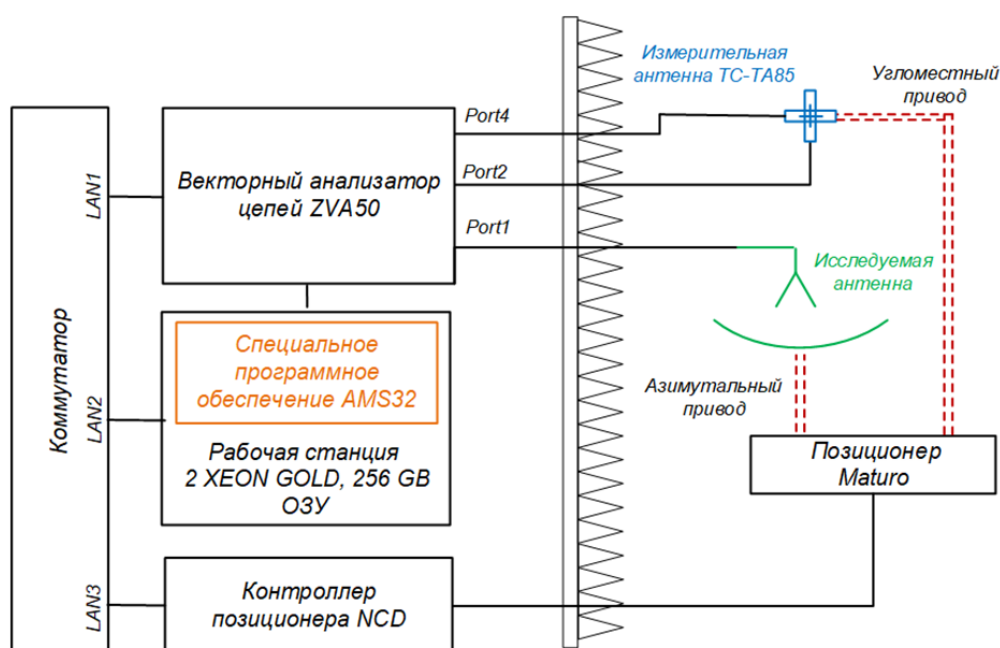


Рис. 5. Структурная схема стенда для контроля и настройки параметров антенн земной станции спутниковой связи

В качестве одной из антенн используется пробник ближнего поля на основе двухполяризационной антенны Вивальди, в качестве второй – исследуемая антенна (рис. 6).

Антенны закрепляются на позиционере, осуществляющем механическое перемещение антенн друг относительно друга таким образом, что точки выборки АФР располагаются на сферической поверхности. Управление перемещением позиционера и измерения на векторном анализаторе цепей

проходят в автоматическом режиме и синхронизированы во времени.

Управление ведется с внешнего компьютера со специальным программным обеспечением (СПО) с использованием ресурсов контроллера NCD Maturo. СПО собирает результаты измерения АФР в ближней зоне и с помощью математических алгоритмов проводит пересчет в полную трехмерную ДН антенны в дальней зоне. По данной диаграмме определится значение коэффициента

усиления исследуемой антенны, для чего предварительно система калибруется с использованием набора рупорных антенн.

На разработанном стенде была подвергнута испытаниям антенна ЗССС, представляющая собой двухзеркальную конструкцию схемы Кассегрена с параболическим рефлектором диаметром 1,2 м и контррефлектором, имеющим специальный профиль центрального сечения отражающей поверхности (рис. 7).

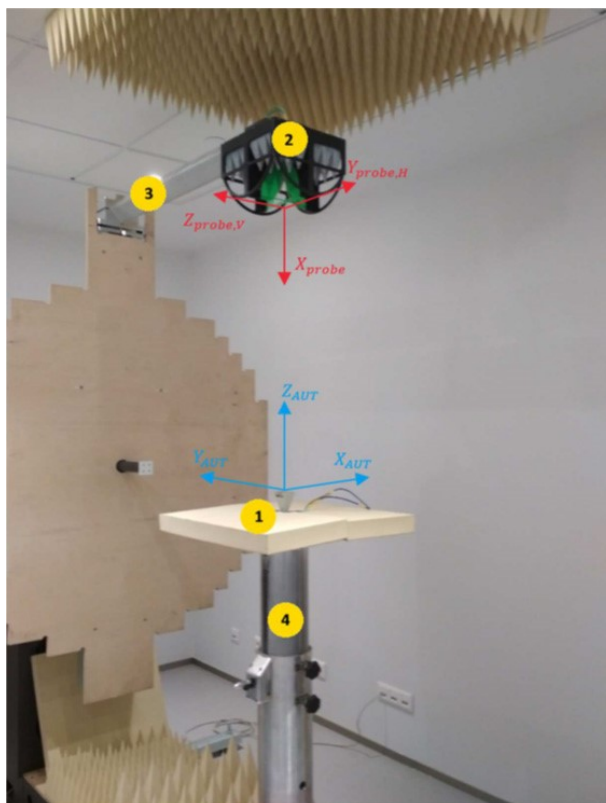


Рис. 6. Общий вид рабочей зоны сферического позиционера: 1 – эталонная (испытуемая) антенна; 2 – пробник поля (зонд); 3 – мачта угломестного привода позиционера; 4 – опора стола азимутального привода позиционера

В соответствии с результатами расчетов рассматриваемый вариант исполнения антенны обеспечивает следующие проектные значения:

- КУ – не менее 44,8 дБ;
- расчетные уровни первых боковых лепестков ДН (УБЛ) – не более –19,4 дБ;
- ширина ДН антенны по уровню –3 дБ составляет порядка 0,8°.

На рис. 8 представлена расчетная ДН антенны на частоте приема ЗССС 19,472 ГГц.



Рис. 7. Рабочее место стенда с установленной зеркальной антенной с диаметром рефлектора 1,2 м

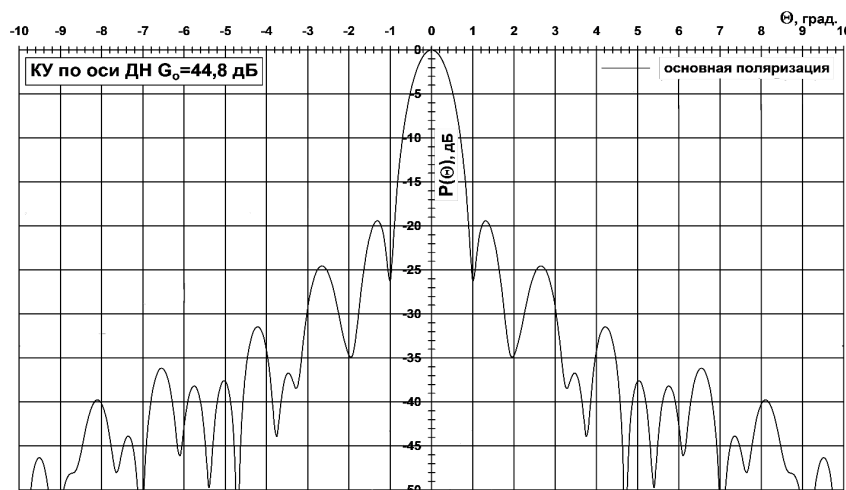


Рис. 8. Расчетная ДН на частоте приема 19,472 ГГц

Для проведения измерений КНД антенны, построения ДН, определения УБЛ и вычисления КУ к приемному порту антенны был подключен коаксиально-волноводный переход с сечением волноводного окна $11 \times 5,5$ мм и проведены измерения в секторе $\pm 10^\circ$ с шагом $0,4^\circ$. Время измерения заняло порядка 35 минут. Результаты измерений представлены на рис. 9.

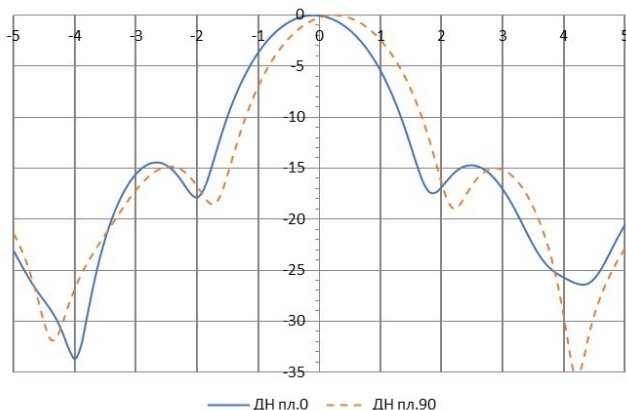


Рис. 9. Измеренная ДН антенны на частоте приема ЗССС 19,472 ГГц

Таблица

Направленные характеристики антенны ЗССС

Параметр	Расчетное значение	Пл. 0°	Пл. 90°
Максимум КНД, дБ	45,8	37,88	38,06
Направление главного максимума, $^\circ$	0	-0,1	0,2
УБЛ, дБ	-19,4	-14,7	-15,01
Ширина ДН, $^\circ$	0,8	1,7	1,6

Таким образом, применение метода спирального сканирования позволяет за достаточно

небольшое время получить реальные характеристики антенны и проводить анализ причин отклонений, измеренных от рассчитанных характеристик.

Из анализа характеристик, приведенных в табл., можно сделать вывод, что увеличение ширины главного лепестка ДН исследуемой антенны по сравнению с расчетными данными привело к уменьшению КНД и увеличению УБЛ.

Одной из возможных причин полученных в результате измерения отклонений – нахождение облучающей системы не в фокусе. Нельзя однозначно утверждать, вследствие чего произошло отклонение – из-за конструктивных особенностей антенны (отклонение облучающей системы от оси, влияние корпуса для оборудования и т. д.) или из-за наклона антенны на рабочем столе.

Заключение

Разработанный на основе сферического скалера Rohde & Schwarz TS8991 стенд для контроля и настройки параметров антенн земной станции спутниковой связи, используя метод спирального сканирования, способен с достаточной точностью и достоверностью измерять характеристики антенных систем.

Достоинством стенда, построенного по изложенным принципам, будет являться меньшее время, необходимое для проведения измерений параметров исследуемых антенн.

Время измерений и преобразований в дальнейшем поле для антенны с диаметром рефлектора 1,2 м с помощью такого стенда составило 35 минут. При этом в случае применения амплифазометрического метода время измерений будет составлять порядка 9 часов, а при применении компактного полигона – около 2,5 часа.

Список литературы

- [1] Выгонский Ю. Г. Предложения по созданию космической системы для предоставления телематических услуг связи // Фундаментальные исследования. 2014. № 9–4. С. 719–723.
- [2] Андреев А. М., Богинский Л. П., Гришин М. В. Принципы построения зарубежных спутниковых систем персональной подвижной связи : учеб. пособие. СПб. : ВКА имени А. Ф. Можайского, 2008. 345 с.
- [3] Dmitriev D. D., Gladyshev A. B., Ratuschnyuk V. N., Grithan O. B. Software and hardware complex for the development and research of methods for broadband access to multimedia resources and the Internet // Journal of Physics: Conference Series – 2nd International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies. 2020. vol. 1515. issue 3. doi: 10.1088/1742-6596/1515/3/032041
- [4] Захарьев Л. Н. Методы измерения характеристик антенн СВЧ. М. : Радио и связь, 1985. 368 с.
- [5] Валитов Р. Р., Киселев С. К. Измерение основных характеристик фазированной антенной решетки для доплеровского измерителя составляющих скорости авиационного применения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20. № 4–3 (84). С. 351–361.
- [6] Миляев П. В., Калинин Ю. Н. Современные методы и средства измерения характеристик антенн // Метрология в радиоэлектронике : тезисы докладов IX Всеросс. науч.-техн. конф. 2014. С. 16–20.
- [7] Мухин А. В. Исследование радиотехнических характеристик зеркальных антенн космических аппаратов :

дисс. ... канд. техн. наук: 05.12.07. Томск, 2016. 140 с.

- [8] Кирпанев А. В., Кирпанев Н. А. Принципы исследования антенн с обтекателем регулярной формы с помощью сферического сканера // Вопросы радиоэлектроники. 2020. № 4. С. 14–21.
- [9] Испытательная система для измерения характеристик беспроводной связи R&S TS8991 [Электронный ресурс]. URL: https://www.rohde-schwarz.com/ru/product/ts8991-productstartpage_63493-8444.html (дата обращения 15.08.20).
- [10] TS8991 OTA Performance Test System. Perfect characterization of wireless products over the air interface [Электронный ресурс]. URL: https://www.av-iq.com/avcat/images/documents/datasheet/ts8991_datasheet.pdf (дата обращения 15.08.20).

STAND FOR MEASURING THE DIRECTIONAL CHARACTERISTICS OF ANTENNAS OF SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS

**A. B. Gladyshev¹, D. D. Dmitriev¹, V. N. Ratushnyak¹,
A. V. Zhgun¹, O. B. Gritsan²**

¹ Siberian Federal University,
Krasnoyarsk, Russian Federation

² JSC «Academician M. F. Reshetnev» Information Satellite Systems»,
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation

The development of network based on satellite communication systems is a promising solution for providing telecommunications services in the Arctic. Therefore, the task of developing and creating earth stations for advanced satellite communication systems that have characteristics significantly higher than their world counterparts is actual. Characteristics of such stations depend on antenna's systems characteristics that determine the energy characteristics of the communication channel. The aim of this work is a stand developing for measuring directional characteristics of antennas of satellite communication systems based on the spherical scanner (TS8991). Spiral scanning is an alternative measurement method aimed at reducing measurement time with saving necessary accuracy. As a result of this work, the spiral scanning algorithm based on the near-field scanner Rohde & Schwarz TS8991 was implemented. Moreover, the stand for monitoring and configuring the parameters of satellite earth station antennas was built. Block diagram of this stand is presented in article. An antenna with 1,2 m diameter of reflector was tested on the developed stand. The measurement results showed deviations of the measured values from the calculated values, which related by design disadvantages of the antenna. The stand using time was 35 minutes for measurements and conversions to the far field, for an antenna with 1,2 m diameter of reflector.

Keywords: satellite communication system, measurement of antenna parameters, flat scanner, cylindrical scanner, spherical scanner.

References

- [1] Vygon'skiy Yu. G. *Predlozheniya po sozdaniyu kosmicheskoy sistemy dlya predostavleniya telematicheskikh uslug svyazi* [Proposals for the establishment of space systems to provide telematics services] // Fundamental research, 2014, no. 9–4, pp. 719–723. (In Russian)
- [2] Andreev A. M. *Principy postroeniya zarubezhnykh sputnikovyykh sistem personal'noj podvizhnoy svyazi* [Principles of building foreign satellite systems of personal mobile communication: studying manual]. St. Petersburg, Military academy of A. F. Mozhaisky, 2008. 345 p. (In Russian)

- [3] Dmitriev D. D., Gladyshev A. B., Ratuschnyak V. N., Grithan O. B. Software and hardware complex for the development and research of methods for broadband access to multimedia resources and the Internet // Journal of Physics: Conference Series – 2nd International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies, 2020, vol. 1515, issue 3. doi: 10.1088/1742-6596/1515/3/032041
- [4] Zakhariev L. N. *Metody izmereniya harakteristik antenn SVCH* [Methods for measuring the characteristics of microwave antennas]. Moscow, Radio and communications, 1985. 368 p. (In Russian)
- [5] Valitov R. R., Kiselev S. K. *Izmerenie osnovnykh harakteristik fazirovannoy antennoj reshetki dlya doplerovskogo izmeritelya sostavlyayushchih skorosti aviacionnogo primeneniya* [Measurement of the main characteristics of a phased array antenna for a Doppler speed meter for aviation applications] // Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2018, vol. 20, no. 4–3 (84), pp. 351–361. (In Russian)
- [6] Milyaev P. V., Kalinin Yu. N. *Sovremennye metody i sredstva izmereniya harakteristik antenn* [Modern methods and tools for measuring antenna characteristics]. Abstracts of the IX Russian scientific and technical conference «Metrology in radio electronics», 2014, P. 16–20. (In Russian)
- [7] Mukhin A. V. Research of radio technical characteristics of mirror antennas of spacecraft : Cand. Diss. Tomsk, 2016, 140 p.
- [8] Kirpanev A. V., Kirpanev N. A. *Principy issledovaniya antenn s obtekatelem regul'arnoy formy s pomoshch'yu sfericheskogo skanera* [Principles of antennas research with a shape fairing by using a spherical scanner] // Issues of radio electronics, 2020, no. 4, pp. 14–21. (In Russian)
- [9] *Ispytatel'naya sistema dlya izmereniya harakteristik bosprovodnoj svyazi R&S TS8991* [Test system for measuring the characteristics of wireless communications R&S TS8991]. Available at: https://www.rohde-schwarz.com/ru/product/ts8991-productstartpage_63493-8444.html (accessed 15.08.20). (In Russian)
- [10] TS8991 OTA Performance Test System. Perfect characterization of wireless products over the air interface. Available at: https://www.av-iq.com/avcat/images/documents/datasheet/ts8991_datasheet.pdf (accessed 15.08.20).

Сведения об авторах

Гладышев Андрей Борисович – начальник кафедры Сибирского федерального университета. Окончил Военный университет ПВО (г. Тверь) в 2000 году. Область научных интересов: радиолокация и радионавигация, системы связи.

Грицан Олег Борисович – начальник сектора АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». Окончил Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева в 2010 году, в 2013 году – аспирантуру (там же). Область научных интересов: станции спутниковой связи.

Дмитриев Дмитрий Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Сибирского федерального университета. Окончил Красноярское высшее командное училище радиоэлектроники ПВО в 1995 году. Область научных интересов: радиолокация и радионавигация, системы связи.

Жгун Александр Вячеславович – студент Сибирского федерального университета. Область научных интересов: радиолокация и радионавигация, системы связи.

Ратушняк Василий Николаевич – кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры АСУ ВКС Сибирского федерального университета. Окончил филиал Военного университета ПВО в 2002 году. Область научных интересов: радиолокация и радионавигация, системы связи.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОНЯТИЙ ОДНОРОДНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ КОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

С. М. Голованов✉, В. И. Орлов, В. В. Федосов

АО «Испытательный технический центр – НПО ПМ»,
г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация

В современных условиях в Российской Федерации комплектация космических аппаратов высоконадежной электронной компонентной базой возможна только через испытательные технические центры, которые выступают в качестве связующего звена между заводами-изготовителями электронных компонентов и их потребителями. Учитывая отсутствие в нашей стране специализированного производства электронных компонентов категории качества «Space», такой подход является единственным альтернативным путем. Испытательные технические центры осуществляют формирование партий электронной компонентной базы космического применения посредством проведения дополнительных испытаний электронных компонентов общего военного применения, позволяющих осуществить отбраковку содержащих дефекты элементов, которые могут проявить себя при длительном функционировании в космическом пространстве. Современный космический аппарат содержит порядка 100–200 тысяч электронных компонентов. С учетом того, что бортовая аппаратура космического аппарата при его эксплуатации не подлежит ремонту, очевидно, что к электронной компонентной базе космического применения предъявляются исключительно высокие требования по надежности. В связи с этим совершенствование методологии повышения надежности электронной компонентной базы космического применения имеет первостепенное значение для дальнейшего развития космической отрасли. В настоящей статье изложен подход к усовершенствованию технологии дополнительных испытаний в испытательных технических центрах, основанный на применении понятий однородности испытываемой партии электронных компонентов, что позволяет осмысленно осуществлять формирование выборок для разрушающего физического анализа и испытаний на радиационную стойкость, а также дополнительно выявлять элементы-выбросы, являющиеся потенциально ненадежными элементами.

Ключевые слова: электронная компонентная база, космическое применение, испытательный технический центр, однородность партии элементов.

Введение

В процессе развития космической индустрии сроки активного существования (САС) космических аппаратов (КА) неуклонно увеличиваются. Если в 80-х годах прошлого века САС КА составлял 3–5 лет, то современные КА должны обеспечивать бесперебойное выполнение своих задач в течение 10–15 лет.

При этом современный КА содержит порядка 100–200 тысяч электронных компонентов. С учетом того, что бортовая аппаратура КА при его

эксплуатации не подлежит ремонту, очевидно, что к электронной компонентной базе (ЭКБ) космического применения предъявляются исключительно высокие требования по надежности [1; 2]. В связи с этим совершенствование методологий повышения надежности ЭКБ космического применения имеет первостепенное значение для дальнейшего развития космической отрасли [3].

1. Дополнительные испытания ЭКБ в испытательных технических центрах

В современной России комплектование КА ЭКБ космического применения имеет определен-

✉ gsm-itc@yandex.ru

ную специфику. В США, Японии, Китае и странах Европейского Союза организовано специализированное производство электронных компонентов для космической отрасли (категория качества «Space»), превосходящих по качеству компоненты для других отраслей.

В Советском Союзе при его централизованной экономике, к сожалению, такое производство не было создано. В современной России создание специализированных производств ЭКБ космического применения оказалось неразрешимой задачей. Объем потребления ЭКБ космической отрасли России составляет не более 2 % от общего объема производства этих изделий [4]. Для создания специализированного производства электронных компонентов категории «Space» требуются значительные инвестиции и большой объем организационно-технических мероприятий, что в условиях рыночной экономики отечественные предприятия электронной промышленности не могут себе позволить.

Исходя из этих реалий, космическая отрасль в России задачу комплектования аппаратуры КА электронными компонентами требуемого качества вынуждена решать самостоятельно. Это привело к созданию в рамках Государственной корпорации «Роскосмос» испытательных технических центров (ИТЦ), специализирующихся на выполнении данной задачи [5; 6]. Функция ИТЦ состоит в том, чтобы из партий ЭКБ общего военного применения отобрать нужное количество элементов, удовлетворяющих жестким требованиям космической отрасли.

В настоящее время, с учетом накопленного опыта, методология формирования партий ЭКБ космического применения, в общих чертах, выглядит следующим образом [7].

Для формирования партии ЭКБ космического применения в ИТЦ проводятся дополнительные испытания (ДИ) ЭКБ общего военного применения, в том числе ЭКБ повышенной надежности («ОС», «ОСМ», «Н»). Количество элементов поступившей на испытания партии ЭКБ всегда превышает количество элементов, необходимых для применения в аппаратуре.

ДИ состоят из трех видов испытаний:

- а) неразрушающие или дополнительные отбраковочные испытания (ДОИ) для 100 % ЭКБ поступившей партии;
- б) выборочный разрушающий физический анализ (РФА);
- в) испытания на радиационную стойкость.

ДОИ – это не наносящие вреда элементам испытания, позволяющие выбрать лучшие в смысле надежности образцы. Для обеспечения максимального качества ДОИ подвергаются все (без исключения) электронные компоненты космического применения.

ДОИ состоят из двух групп операций:

- а) контроль технологии изготовления неразрушающими методами;
- б) параметрический анализ.

Контроль технологии изготовления неразрушающими методами включает в себя:

- контроль наличия посторонних частиц в подкорпусном пространстве элементов ЭКБ;
- контроль герметичности корпуса элементов ЭКБ.

Параметрический анализ – это контроль, основанный на измерениях электрических параметров ЭКБ. Параметрический анализ включает в себя:

- контроль электрических параметров ЭКБ по ужесточенным нормам;
- электротермотренировка (ЭТТ) ЭКБ с контролем электрических параметров по ужесточенным нормам до и после ЭТТ;
- расчет дрейфа электрических параметров ЭКБ в процессе ЭТТ и контроль величины этого дрейфа;
- диагностические испытания (контроль вольт-амперных характеристик, побитовых токов, *m*-характеристик, токов потребления по шинам питания в момент переключения и пр.).

По результатам проведения ДОИ вся ЭКБ делится на три группы:

- а) группа элементов ЭКБ, годных для космического применения;
- б) группа бракованных элементов ЭКБ;
- в) группа потенциально ненадежных элементов ЭКБ.

Группу годных для космического применения элементов ЭКБ составляют элементы, прошедшие ДОИ без замечаний.

В группу бракованных элементов ЭКБ входят элементы, для которых значения электрических параметров выходят за пределы границ, указанных в технических условиях (ТУ) на данный тип ЭКБ.

Группу потенциально ненадежных элементов ЭКБ составляют элементы, электрические параметры которых соответствуют ТУ, но не выполнившие какие-либо дополнительные требования в процессе ДОИ.

РФА – испытания, которые необходимы для оценки качества изготовления ЭКБ, но приводящие к разрушению испытуемых элементов. Соответственно, испытания такого рода могут проводиться только над специально сформированными тестовыми выборками с последующим распространением результатов испытаний на всю партию ЭКБ.

РФА содержит следующие операции:

- контроль содержания паров воды и анализ газов в подкорпусном пространстве ЭКБ;
- плазмохимическое травление и вскрытие пластмассовых корпусов;

- энергодисперсионный микроанализ поверхности кристаллов и различных загрязнений;
- внутренний визуальный осмотр с помощью растровой электронной микроскопии;
- контроль прочности внутренних соединений, испытания на сдвиг кристалла;
- контроль прочности крепления внешних выводов;
- контроль качества ЭКБ с использованием рентгеновского оборудования.

В случае необходимости подтверждения характеристик радиационной стойкости ЭКБ проводятся испытания на радиационную стойкость на специально сформированной для этих целей тестовой выборке ЭКБ с последующим распространением результатов испытаний на всю партию. Проведение такого рода испытаний – задача, требующая специализации. Поэтому, как правило, большинство ИТЦ проводит эти работы в организациях, имеющих соответствующую компетенцию.

Формирование тестовых выборок для РФА и радиационных испытаний производится случайным образом. По результатам проведения РФА и радиационных испытаний принимается окончательное решение о судьбе партии ЭКБ. Если эти испытания дали положительный результат, то элементы, прошедшие ДООИ без замечаний, составляют партию ЭКБ, годную для космического применения. В случае отрицательных результатов вся партия ЭКБ признается негодной для космического применения.

2. Применение понятий однородности партий ЭКБ при проведении ДИ

Следует отметить, что приведенная выше методология ДИ является плодом многолетней творческой работы и хорошо зарекомендовала себя на практике. С другой стороны, к ней нельзя относиться как к чему-то окончательному и неизменному. Нужно ее дальнейшее совершенствование с учетом последних достижений в методологии испытаний и аппаратной части испытательного оборудования.

Применение понятий однородности партий ЭКБ является путем к дальнейшему усовершенствованию методологии ДИ.

Суть предложений состоит в следующем. В существующей методологии ДИ параметрический анализ носит персонифицированный характер, то есть осуществляется анализ электрических параметров испытываемых элементов с целью определения характеристик конкретного элемента. Вместе с тем, вся совокупность измерений параметров элементов партии ЭКБ несет в себе обобщенную информацию о свойствах партии в целом.

Очевидно, что эту обобщенную информацию можно и, главное, нужно использовать для повышения качества ДИ. И вот почему. За последнее десятилетие функциональная сложность, например, интегральных схем (ИС) возрасла в разы и даже в десятки раз. А это означает, что объем обрабатываемой информации одним корпусом ИС также существенно повысился, а значит, в приборах стало меньше ИС и это привело к повышению требований к надежности каждого корпуса. Следовательно, контроль качества ИС должен быть усилен.

Одной из обобщенных характеристик партии ЭКБ является такая характеристика как однородность. При этом можно выделить два различных понятия однородности.

Первое понятие. Назовем его *однородностью первого рода*, как возможность разбиения партии ЭКБ на группы (кластеры) элементов, близких друг к другу по своим характеристикам и при этом далеких по характеристикам от элементов других групп.

Второе понятие. Соответственно, назовем его *однородностью второго рода*, как меру сходства характеристик элементов внутри группы, обладающей однородностью первого рода.

Предположим, по результатам анализа измерений электрических параметров партия ЭКБ делится на ярко выраженные однородные (первого рода) группы. Очевидно, этот факт является отражением глубинных свойств, присущих данной партии: вариации в используемом сырье и примененной технологии изготовления, разные условия транспортировки и хранения и т. д.

Обладать этой информацией полезно. Полезно, в первую очередь, при формировании тестовой выборки для проведения РФА и испытаний на радиационную стойкость, так как, очевидно, что для уверенного распространения результатов на всю партию ЭКБ в тестовую выборку должны попасть представители всех выделенных однородных групп. Как было отмечено выше, в существующей технологии ДИ формирование тестовых выборок осуществляется случайным образом.

Это, в какой-то степени, оправдано в том случае, если партия попадает на испытания напрямую от завода-изготовителя с его гарантией, что вся она является частью одной технологической партии.

Но, во-первых, как говорится, доверяй, но проверяй. Во-вторых, в условиях рыночной экономики поставки ЭКБ зачастую производятся через посредников (квалифицированных поставщиков), при этом судьба поставленной партии может быть весьма туманной. При поставке же партии ЭКБ импортного производства проверка ее на однородность просто необходима.

Таким образом, осознанное формирование тестовых выборок для проведения РФА и радиа-

ционных испытаний на базе полученной информации об однородности партии ЭКБ, бесспорно, повысит уверенность в правильности интерпретации результатов анализов.

Информация об однородности второго рода испытываемой партии ЭКБ, в свою очередь, полезна при отбраковке сомнительных по качеству элементов.

Пусть по результатам измерения электрических параметров определено, что партия ЭКБ составляет одну однородную группу (обладает качеством однородности первого рода) или разбивается на несколько групп. Далее каждая группа анализируется на однородность второго рода, оценивая меру сходства характеристик элементов внутри группы. Этот анализ нужен для выявления так называемых элементов-выбросов. Элементы-выбросы – это элементы, значительно отличающиеся по своим характеристикам от большинства элементов группы.

Элементы-выбросы, судя по всему, обладают определенными дефектами, выделяющими их среди других элементов. Эти дефекты, конечно, могут быть «безвредными». Но, в то же самое время, с довольно большой вероятностью, эти дефекты в процессе эксплуатации (а это 10–15 лет) могут привести к преждевременному отказу элемента. Отсюда вывод – элементы-выбросы целесообразно отнести в группу потенциально ненадежных элементов и не допустить их попадание в аппаратуру КА.

Очевидно, что определение однородности и элементов-выбросов на практике усложняется наличием шумовых и температурных составляющих при замерах электрических параметров. Для уменьшения этого влияния желательно использовать максимально возможное количество измерений. В процессе проведения ДИ, как правило, происходит от двух до четырех измерений, так что наиболее достоверный результат возможен после последнего измерения.

К сожалению, при организации ДИ приходится учитывать целый комплекс разноплановых факторов. Один из таких факторов – продолжительность проведения ДИ. Как это ни парадоксально, но с учетом всех проблем, возникающих в процессе ДИ, именно соблюдение сроков поставки испытанных партий ЭКБ является наибольшей проблемой для любого ИТЦ. Поэтому ДИ производятся с максимальным уплотнением графика испытания, в связи с чем, ДОИ, РФА и испытания на радиационную стойкость стараются проводить параллельно. В связи с этим, непозволительной роскошью является откладывание формирования тестовых выборок для РФА и радиационных испытаний на завершающий этап ДИ.

Разумным компромиссом является вариант формирования тестовых выборок после первого

измерения электрических параметров в процессе ДИ. При этом даже ошибочное или неточное деление партии элементов на группы не выглядит катастрофично, так как в этом случае вариант формирования тестовой выборки ничем не хуже варианта случайного формирования, как это делается по существующей методике.

Определение же элементов-выбросов без ущерба для общего времени ДИ можно проводить в конце ДИ с учетом всей полученной в процессе ДИ информации.

Для практического применения понятий однородности партий ЭКБ в процессе ДИ специалистами АО «ИТЦ – НПО ПМ» (г. Железнодорожск) совместно с учеными СибГУ (г. Красноярск) разработана математическая база и комплекс алгоритмов формирования однородных групп [8–10]. В процессе фундаментальных исследований были определены основные необходимые понятия и алгоритмы:

- введены математические понятия однородности (1-го и 2-го рода);
- определены алгоритмы нормирования исходных данных;
- определены критерии качественного деления партии элементов на однородные группы;
- определены критерии формирования элементов-выбросов;
- введены понятия и определены критерии значимых отличий между однородными группами, а также между элементами-выбросами и однородными группами, которым они принадлежат.

Осуществлена отработка алгоритмов на архивной базе данных ДИ, проведенных в АО «ИТЦ – НПО ПМ». В настоящее время в АО «ИТЦ – НПО ПМ» идет процесс внедрения алгоритмов формирования однородных групп в методологию ДИ.

3. Примеры применения понятий однородности в процессе ДИ

Для иллюстрации применения понятий однородности в процессе ДИ приведем наиболее типичные примеры из архивной базы данных АО «ИТЦ – НПО ПМ».

Пример 1.

На ДИ в АО «ИТЦ – НПО ПМ» в соответствии с заявкой поступила партия интегральных схем (ИС) 1594ИР35Т: код партии – 184/679, дата изготовления – 1846 (46-я неделя 2018-го года), количество элементов в партии – 75. Период проведения ДИ: 27.09.2019–18.10.2019. Для проведения РФА случайным образом были отобраны три элемента партии, остальным элементам партии присвоены номера от 1 до 72. В процессе ДИ осуществлены четыре контрольных измерения элек-

трических параметров: два – до ЭТТ, два – после ЭТТ. В процессе ДООИ три элемента партии с номерами 22, 42 и 69 были определены как потенциально ненадежные – по превышению значений ужесточенных норм, остальные 69 элементов признаны годными для космического применения. Так как по результатам РФА замечаний к технологии изготовления партии элементов нет, то результаты ДИ являются окончательными.

Применим разработанные алгоритмы определения однородности партии ЭКБ к полученным результатам. Для данного вида ИС для определения однородности используются значения 146-ти электрических параметров. Таким образом, каждому элементу партии ИС 1594ИР35Т по результатам измерения электрических параметров соответствует точка в 146-мерном пространстве.

Представить такое пространство довольно сложно, даже имея феноменальное воображе-

ние. Для визуализации результатов измерений используется математический прием – метод многомерного шкалирования (ММШ), позволяющий любое n -мерное пространство с минимальным искажением отобразить на плоскости. На рис. 1а–1г с использованием ММШ представлены результаты измерения электрических параметров в процессе ДИ.

В соответствии с предложенной методикой произведем определение однородности (первого рода) партии ИС 1594ИР35Т по результатам первого измерения электрических параметров в процессе ДООИ. Получим результат: рассматриваемая партия однородна. Визуализация результатов всех измерений (рис. 1а–1г) подтверждает правильность этого вывода.

Формирование тестовой выборки для РФА.

В соответствии с предложенным подходом тестовая выборка для проведения РФА должна формироваться по результатам 1-го измерения

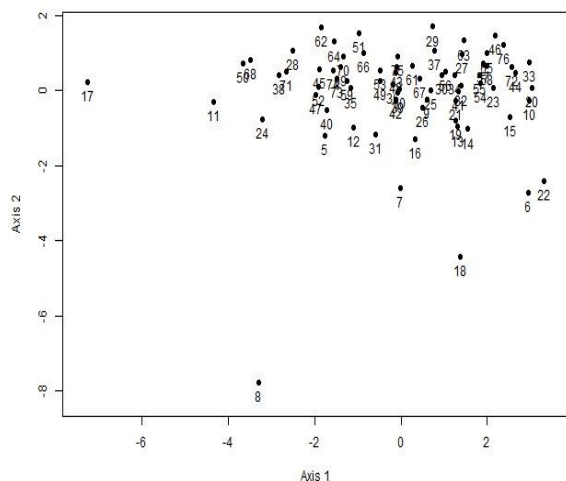


Рис. 1а. ИС 1594ИР35Т. Результаты 1-го измерения электрических параметров до ЭТТ

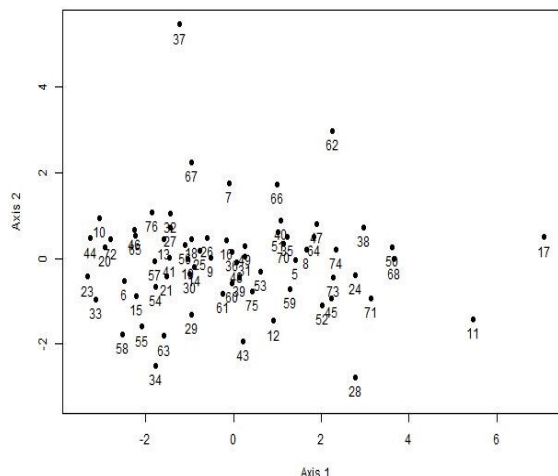


Рис. 1б. ИС 1594ИР35Т. Результаты 2-го измерения электрических параметров до ЭТТ

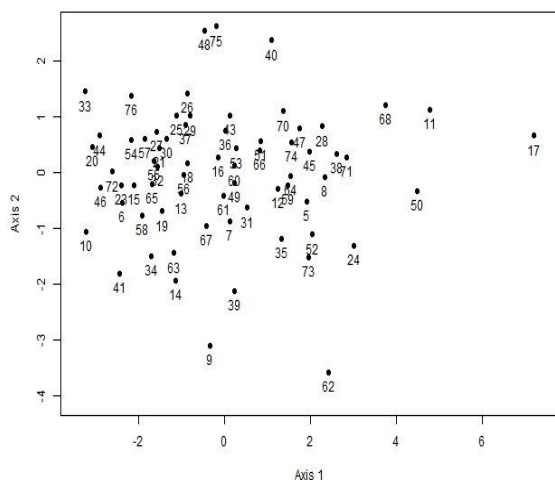


Рис. 1в. ИС 1594ИР35Т. Результаты 1-го измерения электрических параметров после ЭТТ

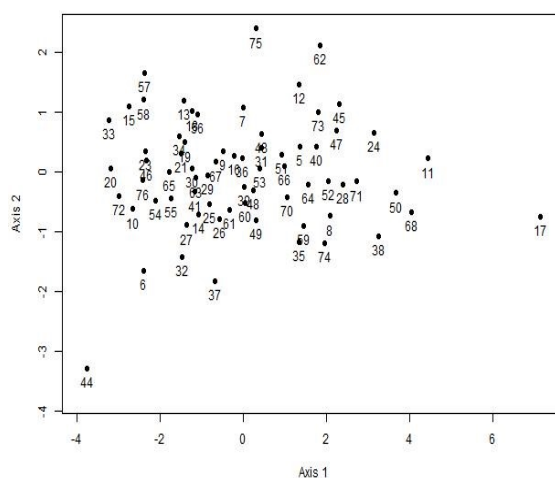


Рис. 1г. ИС 1594ИР35Т. Результаты 2-го измерения электрических параметров после ЭТТ

электрических параметров с учетом того, что партия однородна (или, то же самое, представляет из себя одну однородную группу). При этом возможны две стратегии формирования тестовой выборки:

а) тестовая выборка формируется из самых ярких представителей однородной группы, то есть из элементов, максимально приближенных к центру группы;

б) тестовая выборка формируется из элементов, наиболее удаленных от центра однородной группы, исходя из логики: если наиболее удаленные от центра элементы пройдут РФА без замечаний, то уж ко всем остальным элементам группы тем более замечаний не должно быть.

Пока до конца нет однозначного мнения, какая стратегия предпочтительней, поэтому принимаем компромиссное решение – формировать тестовую выборку комплексно, с учетом обеих стратегий: два элемента (с номерами 8 и 17), наиболее удаленных от центра партии, и один элемент (с номером 48), максимально приближенный к центру партии.

Определение элементов-выбросов.

По результатам каждого измерения электрических параметров происходит определение элементов-выбросов по следующей методике:

- определяется центр однородной группы как среднее арифметическое всех элементов группы (в нормированных координатах);
- определяется пороговый радиус $R_{эв}$ однородной группы;
- все элементы группы проходят проверку: если расстояние от элемента до центра группы больше $R_{эв}$, то элемент считается элементом-выбросом, если меньше – то нет.

В предложенной методике $R_{эв} = 2 \cdot \sigma$, где σ – среднееквадратическое отклонение расстояний до центра всех элементов группы.

Таким образом, в нашем случае имеем:

- при 1-м измерении электрических параметров до ЭТТ к элементам-выбросам отнесены ИС с номерами 8 и 17;
- при 2-м измерении электрических параметров до ЭТТ к элементам-выбросам отнесены ИС с номерами 17 и 37;

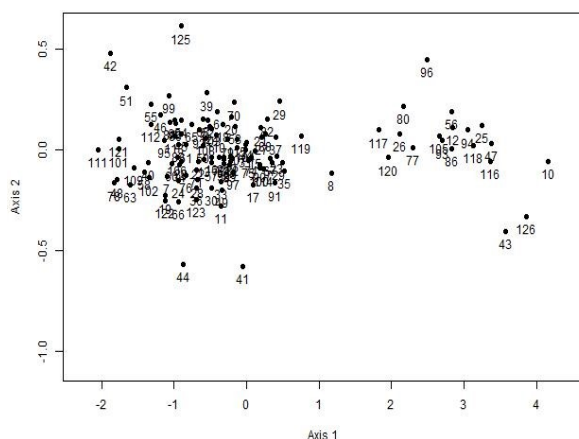


Рис. 2а. ИС 1554TM2T. Результаты 1-го измерения электрических параметров (до ЭТТ)

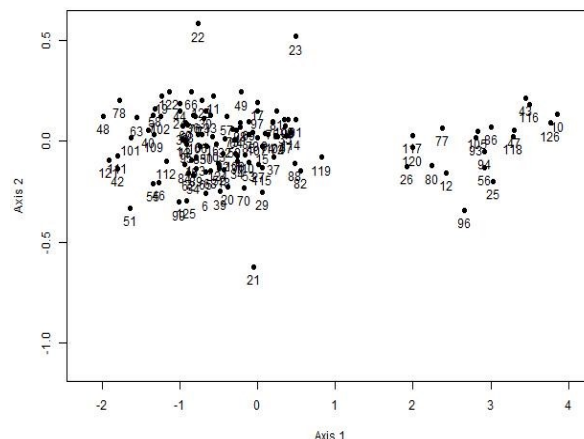


Рис. 2б. ИС 1554TM2T. Результаты 2-го измерения электрических параметров (до ЭТТ)

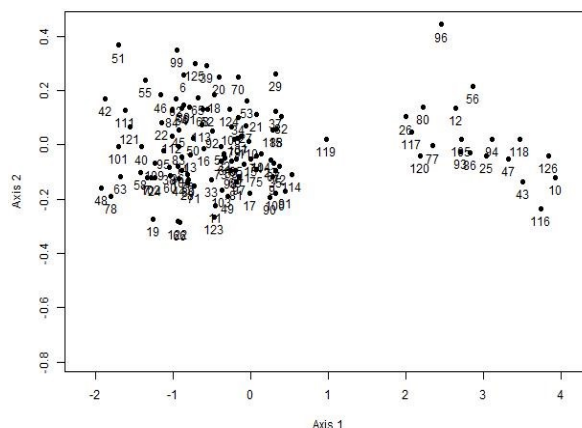


Рис. 2в. ИС 1554TM2T. Результаты измерения электрических параметров (после ЭТТ)

- при 1-м измерении электрических параметров после ЭТТ к элементам-выбросам отнесена ИС с номером 17;

- при 2-м измерении электрических параметров после ЭТТ к элементам-выбросам отнесена ИС с номером 17.

Итого, по результатам всех четырех измерений электрических параметров, к элементам-выбросам может быть отнесена одна ИС с номером 17, как единственная попавшая в эту группу при всех четырех измерениях. Но ИС с номером 17 уже отобрана в тестовую выборку для РФА. Поэтому по результатам анализа на однородность 2-го рода партии ИС 1594ИР35Т предложений по пополнению группы потенциально ненадежных элементов нет.

Пример 2.

На ДИ в АО «ИТЦ – НПО ПМ» в соответствии с заявкой поступила партия ИС 1554ТМ2Т: код партии – 123/355, дата изготовления – 1231 (31-я неделя 2012-го года), количество элементов в партии – 124, период проведения ДИ: 08.02.2013 – 20.02.2013. Для проведения РФА случайным образом были отобраны три элемента партии, остальные элементы партии (121 шт.) после присвоения номеров от 6 до 126 были отправлены на ДИ. В процессе ДИ осуществлено три контрольных измерения электрических параметров: 08.02.2013 и 10.02.2013 (до ЭТТ) и 14.02.2013 (после ЭТТ). В процессе ДИ три элемента партии были определены как потенциально ненадежные: номер 87 – по превышению ужесточенных норм электрических параметров, номер 8 – по наличию посторонних частиц в подкорпусном пространстве, и номер 68 – при диагностических испытаниях. Остальные элементы партии признаны годными для космического применения.

Так как по результатам РФА замечаний к технологии изготовления партии элементов нет, то результаты ДИ являются окончательными. Применим разработанные алгоритмы к полученным результатам. Для данного вида ИС для определения однородности используется 24 электрических параметра. Для визуализации результатов так же, как в предыдущем примере, применим ММШ.

На рис. 2а–2в представлены результаты измерения электрических параметров в процессе ДИ.

Формирование выборки для РФА.

В соответствии с предлагаемым подходом после первого измерения электрических параметров должна формироваться тестовая выборка для проведения РФА. Формироваться она должна с учетом определенной однородности (первого рода) испытываемой партии.

Применив разработанные алгоритмы формирования однородных групп, получим результат: рассматриваемая партия неоднородна и делится на две однородные группы: ОГ1 – 100 элементов

и ОГ2 – 20 элементов. Визуализация результатов всех трех измерений электрических параметров (рис. 2а–2в) подтверждает правильность полученных выводов. Следовательно, в данном случае тестовая выборка для проведения РФА должна формироваться от каждой однородной группы – три элемента от ОГ1 и три элемента от ОГ2.

Выбор конкретных элементов от каждой однородной группы осуществляется в соответствии с методикой, приведенной в примере 1: два элемента – наиболее удаленные от центра однородной группы, один элемент – максимально приближенный к центру однородной группы. Таким образом для РФА от ОГ1 нужно выбрать элементы с номерами: 111, 42 и 16, от ОГ2 – с номерами: 8, 10 и 86.

Определение элементов-выбросов.

Определение элементов-выбросов осуществляется в соответствии с методикой, изложенной в примере 1. С учетом выполнения условия: наличие значимых отличий элементов-выбросов от центров однородных групп, которым они принадлежат, по результатам всех трех измерений элементов-выбросов не зафиксировано. В связи с этим предложений по пополнению группы потенциально ненадежных элементов нет.

По рассмотренным примерам следует дать несколько общих комментариев. Как было отмечено выше, АО «ИТЦ – НПО ПМ», в основном, имеет дело с партиями ЭКБ, полученными напрямую от заводов-изготовителей. В связи с этим существует определенная гарантия того, что полученная партия сформирована из одной технологической партии.

Результаты анализа однородности, проведенного на архивной базе АО «ИТЦ – НПО ПМ», подтверждают эти результаты: 95 % всех партий имеют свойства однородности (первого рода), а результаты измерения их электрических параметров имеют вид, аналогичный приведенному в примере 1. Соответственно, только 5 % всех поступающих на испытания партий ЭКБ носят признаки неоднородности. При этом даже в случае однородности входной партии ЭКБ применение предложенной методики даст положительный эффект, так как она, во-первых, придает определенную осмысленность процессу формирования тестовой выборки для РФА и радиационных испытаний, и, во-вторых, позволяет выявить элементы-выбросы, которые с большой вероятностью могут оказаться источниками отказов в процессе длительной эксплуатации в космических условиях.

Заключение

В современных условиях комплектация аппаратуры КА высоконадежной ЭКБ возможна только через ИТЦ, которые выступают в качестве связующего звена между заводами-изготовителями ЭКБ и ее потребителями. Учитывая отсутствие

в России специализированного производства, это является единственным альтернативным путем.

ИТЦ осуществляет формирование партий ЭКБ космического применения, главным образом, посредством проведения ДИ элементов ЭКБ общего военного применения, позволяющих осуществить отбраковку содержащих дефекты элементов, которые могут проявить себя при длительном функционировании в космическом пространстве.

Несмотря на то, что существующая методология проведения ДИ в ИТЦ зарекомендовала себя с положительной стороны и отработана годами, она не является чем-то застывшим и окончательным. Жизнь требует ее непрерывного развития и усовершенствования с применением новых алгоритмических и технологических подходов.

Одним из таких подходов является применение в технологическом процессе ДИ понятий однородности, что позволяет осмысленно осуществлять формирование выборок для РФА и испытаний на радиационную стойкость, а также выявлять элементы-выбросы, являющиеся потенциально-ненадежными элементами.

Для практического применения изложенного подхода в АО «ИТЦ – НПО ПМ» совместно с учеными СибГУ разработана математическая база и создан соответствующий комплекс программ, отработанный на базе данных АО «ИТЦ – НПО ПМ». В настоящее время в АО «ИТЦ – НПО ПМ» осуществляется практическое внедрение алгоритмов формирования однородных групп в общую методологию ДИ.

Список литературы

- [1] Орлов В. И., Федосов В. В. Качество электронной компонентной базы – залог длительной работоспособности космических аппаратов // Материалы XVII Междунар. науч. конф. «Решетневские чтения». 2013. Т. 1. С. 238–241.
- [2] Субботин В., Стешенко В. Проблемы обеспечения бортовой космической аппаратуры космических аппаратов электронной компонентной базой // Компоненты и технологии. 2011. Вып. 11. С. 10–12.
- [3] Федосов В. В. Комплексный подход к электронной компонентной базе как метод обеспечения длительной работоспособности космических аппаратов // Вестник СибГАУ. 2014. № 5. С. 155–160.
- [4] Данилин Н. С. Информационные технологии и сертификация элементной базы новых российских космических телекоммуникаций : учеб.-метод. пособие. М. : РИО РТА, 2000. 76 с.
- [5] Горлов М., Ануфриев Л., Строгонов А. Отбраковочные технологические испытания как средство повышения надежности партий ИС [Электронный ресурс]. URL: http://www.chipnews.ru/html.cgi/arhiv/01_05/stat-5.htm (дата обращения: 30.04.2019).
- [6] Федосов В. В., Патраев В. Е. Повышение надежности радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов при применении электрорадиоизделий, прошедших дополнительные отбраковочные испытания в специализированных испытательных технических центрах // Авиакосмическое приборостроение. 2006. № 10. С. 50–55.
- [7] Программа дополнительных испытаний электрорадиоизделий в испытательных технических центрах для обеспечения комплектации бортовой аппаратуры КА по заказам Генерального заказчика. Железнодорожск, 2008.
- [8] Казаковцев Л. А., Орлов В. И., Ступина А. А., Масич И. С. Задача классификации электронной компонентной базы // Вестник СибГАУ. 2014. № 4 (56). С. 55–61.
- [9] Golovanov S. M., Orlov V. I., Kazakovtsev L. A., Popov A. M. Recursive clustering algorithm based on silhouette criterion maximization for sorting semiconductor devices by homogeneous batches // Material Science and Aerospace Technology. 2019. vol. 537. doi: 10.1088/1757-899X/537/2/022035.
- [10] Орлов В. И., Федосов В. В., Голованов С. М. Применение итеративного алгоритма максимизации критерия силуэта для формирования однородных групп электронной компонентной базы // Материалы XXIII Междунар. науч.-практ. конф. «Решетневские чтения». 2019. Т. 1. С. 366–368.

USING THE CONCEPTS OF HOMOGENEITY IN ADDITIONAL TESTS OF ELECTRONIC COMPONENTS FOR SPACE APPLICATIONS

S. M. Golovanov, V. I. Orlov, V. V. Fedosov

*JSC «Testing Technical Center – NPO PM»,
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation*

In modern conditions in the Russian Federation the equipment of spacecraft with a highly reliable electronic components is possible only through testing technical centers which act as a

link between manufacturers of electronic components and their consumers. Given the lack of specialized production of electronic components of the «Space» category in our country, this is the only alternative way. Testing technical centers carry out the formation of batches of electronics for space applications by conducting additional tests of electronic components for general industrial use allowing the rejection of elements containing defects that can manifest themselves during long-term operation in outer space. A modern spacecraft contains about 100–200 thousand electronic components. Taking into account the fact that the on-board equipment of the spacecraft during its operation cannot be repaired, it is obvious that extremely high reliability requirements are imposed on the electronic components of space applications. In this regard the improvement of the methodology for increasing the reliability of the electronic components of space applications is of paramount importance for the further development of the space industry. This article outlines an approach to improving the technology of additional tests in testing technical centers, based on the use of the concepts of homogeneity of the tested batch of electronic components which makes it possible to meaningfully generate samples for destructive physical analysis and radiation resistance tests, as well as to additionally identify emission elements that are potentially unreliable elements.

Keywords: electronic components, space application, testing technical center, homogeneity of the batch of elements.

References

- [1] Orlov V. I., Fedosov V. V. *Kachestvo elektronnoy komponentnoy bazy – zalog dlitelnoy rabotosposobnosti kosmicheskikh apparatov* [The quality of the electronic components is the key to the long-term performance of spacecraft]. Materials of the XVII International Scientific Conference «Reshetnev reading», 2013, vol. 1, pp. 238–241. (In Russian)
- [2] Subbotin V., Steshenko V. *Problemy obespecheniya bortovoy kosmicheskoy apparatury kosmicheskikh apparatov elektronnoy komponentnoy bazoy* [Problems of providing onboard space equipment of spacecraft with an electronic components] // Components and technologies, 2011, issue 11, pp. 10–12. (In Russian)
- [3] Fedosov V. V. *Kompleksnyy podkhod k elektronnoy komponentnoy baze kak metod obespecheniya dlitelnoy rabotosposobnosti kosmicheskikh apparatov* [An integrated approach to an electronic components as a method for ensuring long-term performance of spacecraft] // Bulletin SibSAU, 2014, no. 5, pp. 155–160. (In Russian)
- [4] Danilin N. S. *Informatsionnye tekhnologii i sertifikatsiya elementnoy bazy novykh rossiyskikh kosmicheskikh telekommunikatsiy* [Information technology and certification of the element base of new Russian space telecommunications]. Moscow, RIO RTA, 2000, 76 p. (In Russian)
- [5] Gorlov M., Anufriev L., Stroganov A. *Otbrakovochnye tekhnologicheskie ispytaniya kak sredstvo povysheniya nadezhnosti partiy IS* [Screening technological tests as a means of increasing the reliability of IC lots]. Available at: http://www.chipnews.ru/html.cgi/arhiv/01_05/stat-5.htm (accessed 30.04.2019). (In Russian)
- [6] Fedosov V. V., Patraev V. E. *Povyshenie nadezhnosti radioelektronnoy apparatury kosmicheskikh apparatov pri primeneniі elektroradioizdeliy, proshedshikh dopolnitelnye otbrakovochnye ispytaniya v spetsializirovannykh ispytatelnykh tekhnicheskikh tsentrakh* [Increasing the reliability of electronic equipments for spacecrafts by using electronic components that have passed additional testing in specialized testing technical centers]. Aerospace Instrument-Making, 2006, no. 10, pp. 50–55. (In Russian)
- [7] *Programma dopolnitelnykh ispytaniy elektroradioizdeliy v ispytatelnykh tekhnicheskikh tsentrakh dlya obespecheniya komplektatsii bortovoy apparatury KA po zakazam Generalnogo zakazchika* [The program of additional tests of electrical radio products in test technical centers to ensure the completing of the spacecraft onboard equipment according to the orders of the General Customer]. Zheleznogorsk, 2008. (In Russian)
- [8] Kazakovtsev L. A., Orlov V. I., Stupina A. A., Masich I. S. *Zadacha klassifikatsii elektronnoy komponentnoy bazy* [The problem of classification of an electronic components] // Bulletin SibSAU, 2014, no. 4 (56), pp. 55–61. (In Russian)
- [9] Golovanov S. M., Orlov V. I., Kazakovtsev L. A., Popov A. M. Recursive clustering algorithm based on silhouette criterion maximization for sorting semiconductor devices by homogeneous batches // Material Science and Aerospace Technology, 2019, vol. 537. doi: 10.1088/1757-899X/537/2/022035.
- [10] Orlov V. I., Fedosov V. V., Golovanov S. M. *Primenenie iterativnogo algoritma maksimizatsii kriteriya silueta dlya formirovaniya odnorodnykh grupp elektronnoy komponentnoy bazy* [The application of an iterative algorithm of maximization silhouette criteria for the formation of homogeneous groups of electronic components]. Materials of the XXIII International Scientific Conference «Reshetnev reading», 2019, vol. 1, pp. 366–368. (In Russian)

Сведения об авторах

Голованов Сергей Михайлович – ведущий специалист АО «ИТЦ – НПО ПМ». Окончил Алтайский политехнический институт в 1981 году. Область научных интересов: применение математических методов в технологии испытаний изделий электроники.

Орлов Виктор Иванович – кандидат технических наук, директор АО «ИТЦ – НПО ПМ». Окончил Красноярский политехнический институт в 1977 году. Область научных интересов: испытания изделий микроэлектроники.

Федосов Виктор Владимирович – доктор технических наук, профессор, зам. директора – начальник Испытательного центра АО «ИТЦ – НПО ПМ». Окончил Красноярский политехнический институт в 1971 году. Область научных интересов: разработка алгоритмов и испытания изделий микроэлектроники.

ПРИМЕНЕНИЕ КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ АППРОКСИМАЦИИ ВЕРОЯТНОСТНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

И. Л. Крикунов✉, К. Э. Гаипов

Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск, Российская Федерация

На сегодняшний момент времени от спутниковых технологий в той или иной степени зависят многие современные отрасли. Для построения таких спутниковых систем связи необходима оценка параметров качества обслуживания, одним из которых является время задержки информации. Для реализации математической модели спутниковой сети используются такие аналитические выражения для временных задержек, которые имеют неустранимый разрыв второго рода в момент времени, когда интенсивность поступления трафика становится равной интенсивности обслуживания. Устранение данной особенности позволило бы сократить время расчета оптимальных маршрутов. В представленной работе для достижения поставленной цели используется кусочно-линейная аппроксимация. В качестве способа задания прямых рассматриваются два подхода, которые сравниваются с помощью интегрального метода наименьших квадратов, а также рассмотрен вопрос о количестве используемых прямых в условиях поставленной задачи. В качестве результатов были получены аппроксимационные зависимости, позволяющие построить кусочно-линейную функцию среднего времени ожидания в буфере для системы М/М/1. Описана процедура нахождения оптимальных параметров для данной функции, а также аналитическим методом были получены приближенные формулы нахождения точек касания прямых, зависящие от поступающей интенсивности трафика.

Ключевые слова: спутниковый канал, оптимальная маршрутизация, целевая функция, кусочно-линейная аппроксимация.

Введение

Актуальность задачи оптимальной маршрутизации заключается в том, что на текущий момент отсутствуют механизмы и протоколы управления трафиком в зависимости от загрузки спутниковых каналов связи.

Под оптимальной маршрутизацией будем понимать такой алгоритм выбора маршрутов между источником и получателем, при котором выполняется условие, что на всех интерфейсах маршрутизаторов и/или коммутаторов будет находиться минимальное число пакетов или суммарное время нахождения пакетов во всех интерфейсах будет минимально, что можно записать в виде целевой функции вида:

$$F_1 = \sum_i N_i(\lambda) \text{ или } F_2 = \sum_i T_i(\lambda),$$

где $N_i(\lambda)$ – число пакетов на i -ом маршрутизаторе и/или коммутаторе; $T_i(\lambda)$ – время нахождения

пакетов на i -ом маршрутизаторе и/или коммутаторе.

Данные задачи были решены в работах Галлагера, Крона, Парфенова, Гаипова, Пономарева и Вишневого [1–8]. Особенностью решения таких задач является то, что каждое слагаемое целевой функции F_1 и F_2 является функцией, имеющей разрыв в точке $\lambda = \mu$, что позволяет решить эту задачу, предварительно решив систему линейных ограничений для определения начальной точки итерации, нужной для численных методов решения задач нелинейного программирования, к которым и относится задача поиска минимума целевой функции.

Решение задачи поиска начальной итерации увеличивает время решения задачи оптимальной маршрутизации, поэтому целью исследования является уменьшение времени нахождения минимума целевой функции. Для этого необходимо решить две задачи:

- устранение разрыва в функциях $N_i(\lambda)$ и $T_i(\lambda)$ путем выбора оптимального метода аппроксимации;

✉ zaybernev@mail.ru

- анализ выигрыша времени и точности найденного решения с первоначальным алгоритмом.

1. Выбор типа аппроксимации

Как было сказано ранее, функциональная зависимость вероятностно-временных характеристик различных систем массового обслуживания, таких как средняя длина очереди $\bar{N}$ или среднее время нахождения данных на ожидании t в точке, когда интенсивность поступления данных равна интенсивности их обслуживания, имеет разрыв второго рода.

В качестве примера приведем функциональную зависимость среднего времени ожидания, из которого явно видно, что при $\lambda = \mu$ имеет место разрыв. Далее в качестве модели, описывающей интерфейс коммутационного устройства, подключенного к спутниковому каналу, будем использовать систему массового обслуживания М/М/1. Данная зависимость имеет вид:

$$f(\lambda) = \frac{1}{\mu} \frac{1}{1 - \frac{\lambda}{\mu}},$$

где μ – скорость работы интерфейса маршрутизатора.

Для решения задачи оптимального распределения трафика в качестве критерия, как правило, выбирается сумма средних времен ожидания $\sum t$ или сумма средних очередей $\sum \bar{N}$. Для нахождения минимума таких целевых функций необходимо вначале найти область определения данной функции и в этой области выбрать точку начальной итерации для применения методов динамического программирования.

Для устранения этапа нахождения точки начальной итерации необходимо устранить разрыв второго рода и сделать так, чтобы функциональная зависимость средней длины очереди или среднего времени ожидания на всей области определения

была монотонно возрастающей и выпуклой функцией. Для существующих зависимостей это условие выполняется в интервале $[0; \mu)$. Для преодоления этой проблемы в данной работе рассматривается аппроксимация вероятностно-временных характеристик для систем массового обслуживания.

Рассмотрим полиномиальную аппроксимацию. Разложим исходную функцию $f(x)$ в ряд Тейлора. Получаем сумму слагаемых, имеющих вид:

$$f(x)_{\text{пол}} = \sum_{i=0}^M \frac{x^i}{\mu^{i+1}},$$

где μ – скорость работы интерфейса маршрутизатора, M – количество слагаемых в ряду.

Если использовать этот вид аппроксимации, то он устранил разрыв второго рода, но функция не будет выпукла на всей области допустимых значений, что отображено на рис. 1.

Для кусочно-линейной аппроксимации рассмотрим два подхода, с помощью которых задаются прямые [9]:

- прямая, касающаяся исходной функции;
- прямой, являющаяся хордой исходной функции.

Для выбора наилучшего метода составим уравнения этих прямых для двух подходов, используя две, три и четыре прямые. В качестве критерия оценивания будем использовать ошибку аппроксимации, которая находится по формуле:

$$s = \sum_i \int_{y_i}^{y_{i+1}} [f(x) - f_i(x)]^2 dx,$$

где s – ошибка аппроксимации, $f(x)$ – исходная нелинейная функция, $f_i(x)$ – кусочно-линейная функция, i – количество прямых в кусочно-линейной функции.

В данном методе ошибка аппроксимации представляет собой сумму интегралов, где под знаком интеграла находится разность исходной и линейной функций [10].

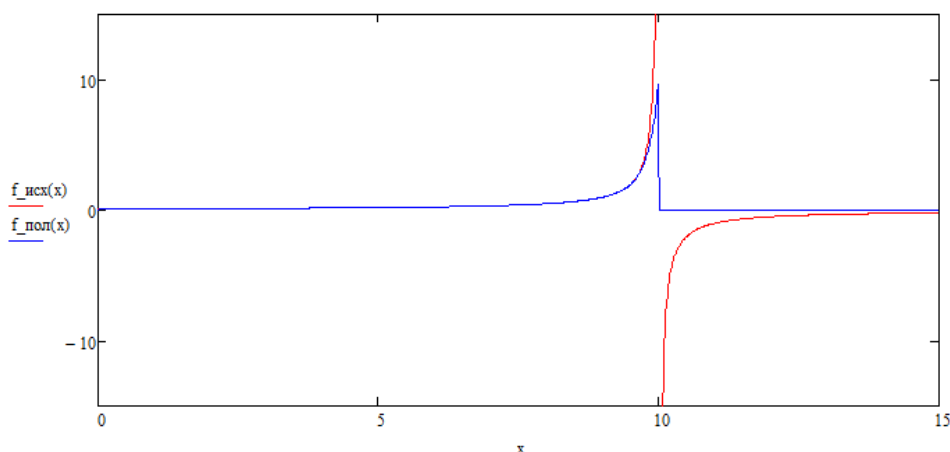


Рис. 1. Графики исходной функции и полиномиального ряда

Расчет ошибки аппроксимации необходимо начать с нахождения оптимальных параметров $(x_0, x_1, \dots, x_i)$ для метода касательных и $(a, b, \dots, i)$ для метода хорд. Под оптимальными параметрами понимаются такие значения, при которых ошибка аппроксимации минимальна для каждого рассмотренного варианта.

В данной задаче ошибка аппроксимации является функцией с множеством локальных экстремумов, т. е. она многоэкстремальная. Аналитическое нахождение минимальных значений приводит к решению систем нелинейных уравнений, что не позволяет аналитически определить все точки экстремума. В связи с этим для нахождения оптимальных параметров данной функции был осуществлен перебор точек начальной итерации для использования метода сопряженного градиента, встроенного в пакет инженерного математического ПО MathCad. Для перебора точек начальной итерации в среде MathCad был исполь-

зован алгоритм перебора параметров $(x_0, x_1, \dots, x_i)$ для метода касательных и $(a, b, \dots, i)$ для метода хорд с учетом следующих особенностей:

- каждый следующий параметр должен быть строго больше предыдущего ($x_{i-1} < x_i$ или $a < b$);
- все параметры для двух методов должны удовлетворять области допустимых значений;
- случаи с отрицательным значением ошибки аппроксимации не должны рассматриваться.

Получив оптимальные значения точек касания и пересечения прямых, необходимо рассчитать значения ошибки при различных интенсивностях поступления трафика. Минимальные значения ошибки аппроксимации и параметров при различных μ представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что метод с использованием касательных имеет значительно меньшую ошибку по сравнению с методом хорд при равных условиях. В дальнейших расчетах целесообразно использовать именно этот подход.

Таблица 1

Значение ошибки аппроксимации для двух методов задания прямых при разных значениях параметра μ

Количество прямых	Касательная			Хорда		
	$\mu = 10$	$\mu = 30$	$\mu = 50$	$\mu = 10$	$\mu = 30$	$\mu = 50$
2	$s = 18,555$	$s = 20,894$	$s = 21,611$	$s = 9360$	$s = 9580$	$s = 9720$
3	$s = 5,845$	$s = 6,938$	$s = 7,311$	$s = 31,25$	$s = 68,863$	$s = 74,105$
4	$s = 2,612$	$s = 3,111$	$s = 3,276$	$s = 31,2$	$s = 50,91$	$s = 62,61$

2. Выбор количества прямых

Выбор количества прямых, участвующих в аппроксимации исходной функции, напрямую зависит от поставленной задачи. С одной стороны, при увеличении количества прямых точность расчетов будет увеличиваться, так как будет уменьшаться ошибка аппроксимации, что наглядно видно, исходя из данных в табл. 1. С другой стороны, при увеличении их количества также будет усложняться и сама целевая

функция (критерий оптимальности), что влечет за собой рост затраченных ресурсов на работу с такой функцией.

На основании выводов предыдущего пункта метод касательных дает меньшую ошибку аппроксимации, в отличие от метода хорд. Учитывая эту информацию, произведен расчет ошибки при различном количестве прямых. В табл. 2 представлены результаты расчета интегрального метода наименьших квадратов, а на рис. 2 – графики зависимостей ошибки аппроксимации от числа прямых.

Таблица 2

Зависимость ошибки аппроксимации от числа прямых

Количество прямых	Интенсивность поступления трафика					
	$\mu = 10$	$\mu = 30$	$\mu = 50$	$\mu = 100$	$\mu = 150$	$\mu = 300$
2	$s = 18,555$	$s = 20,894$	$s = 21,611$	$s = 22,302$	$s = 22,59$	$s = 22,933$
3	$s = 5,845$	$s = 6,938$	$s = 7,311$	$s = 7,695$	$s = 7,875$	$s = 8,071$
4	$s = 2,612$	$s = 3,111$	$s = 3,276$	$s = 3,47$	$s = 3,568$	$s = 3,699$
5	$s = 1,085$	$s = 1,375$	$s = 1,489$	$s = 1,633$	$s = 1,682$	$s = 1,797$
6	$s = 0,566$	$s = 0,731$	$s = 0,799$	$s = 0,879$	$s = 0,949$	$s = 1,054$
7	$s = 0,322$	$s = 0,422$	$s = 0,463$	$s = 0,514$	$s = 0,56$	$s = 0,682$
8	$s = 0,196$	$s = 0,258$	$s = 0,286$	$s = 0,319$	$s = 0,346$	$s = 0,42$

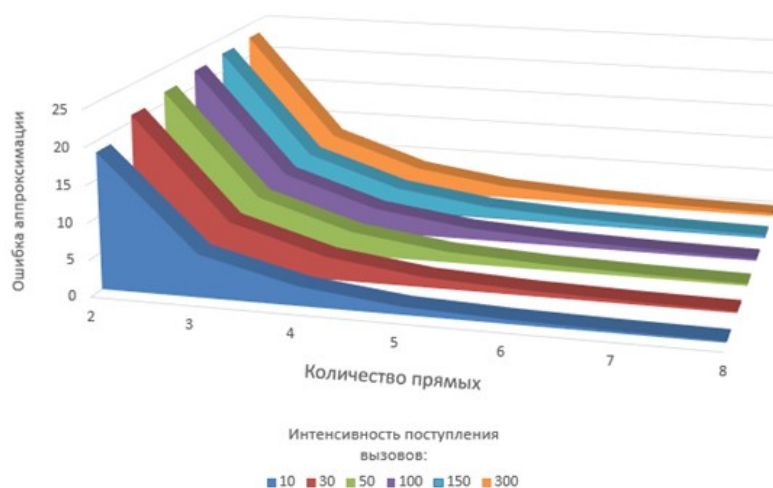


Рис. 2. Графики зависимостей ошибки аппроксимации от числа прямых

Из табл. 2 и рис. 2 можно заметить несколько закономерностей:

- при увеличении количества прямых ошибка аппроксимации уменьшается по некоторому закону;
- закон уменьшения ошибки аппроксимации не зависит от интенсивности поступления вызова, а лишь меняет масштаб.

Для дальнейших расчетов целесообразно использовать аппроксимацию тремя или четырьмя прямыми. Такой выбор обусловлен балансировкой значений ошибки и ресурсов, затраченных на расчет кусочно-линейной функции.

3. Зависимость параметров прямых от интенсивности

Для использования кусочно-линейной функции как критерия оптимальности при дальнейших расчетах на специализированном программном

обеспечении необходимо свести нахождение оптимальных параметров к их арифметическому расчету. Из табл. 2 отчетливо видно, что оптимальное значение коэффициентов ($x_0, x_1, \dots, x_i$) имеет связь со значением интенсивности поступления трафика. Для анализа и дальнейшей корреляции этих значений будет рассмотрен метод касательных с использованием трех прямых. Для этого с помощью описанной ранее программы перебора точек найдем значения оптимальных точек касания при достаточно большом интервале поступающих интенсивностей (от 50 до 1000) и запишем их значения в табл. 3.

Проанализировав эти данные, можно построить зависимость каждого из коэффициентов от интенсивности вызовов. С помощью полученных прямых было получено уравнение корреляции, которое достаточно точно описывает зависимости точек касания, а также построены их графики (рис. 3).

Таблица 3

Зависимость оптимальных точек касания от интенсивности поступления вызовов

Интенсивность поступления вызовов μ	x_1	x_1/μ	x_2	x_2/μ	x_3	x_3/μ
1	0,4979	0,4979	0,9374	0,9374	0,9819	0,9819
50	35,5196	0,71	49,8869	0,9977	49,9787	0,99957
60	42,976	0,7163	59,8859	0,9981	59,9786	0,99967
70	50,4583	0,72	69,8852	0,9984	69,9786	0,99969
80	57,9804	0,725	79,8845	0,9986	79,9786	0,99973
90	65,5336	0,7282	89,8841	0,9987	89,9785	0,99976
100	73,0281	0,73	99,8839	0,999	99,9785	0,99979
110	80,6379	0,733	109,8834	0,999	109,9785	0,9998
120	88,261	0,7355	119,8831	0,9991	119,9785	0,99982
130	96,1238	0,7394	129,8822	0,9991	129,9785	0,99983
140	104,9985	0,75	139,8867	0,9992	139,9786	0,99985

Продолжение таблицы 3

150	112,997	0,7533	149,8825	0,9992	149,9785	0,99986
160	118,584	0,741	159,8823	0,9993	159,9784	0,99987
170	126,9897	0,747	169,8815	0,9993	169,9784	0,99987
180	134,0347	0,7446	179,8814	0,9993	179,9784	0,99988
190	141,3977	0,744	189,8807	0,9994	189,9784	0,99989
200	149,4555	0,7473	199,8838	0,9994	199,9786	0,99989
250	186,6238	0,7465	249,8811	0,9995	249,9784	0,99991
300	225,12	0,75	299,8793	0,9996	299,9783	0,99993
350	267,2272	0,7635	349,8853	0,9997	349,9787	0,99994
400	296,2645	0,74	399,8788	0,9997	399,9784	0,99995
450	357,1871	0,7937	449,8807	0,9997	449,9785	0,99995
500	380,2357	0,76	499,8759	0,9997	499,9781	0,99996
550	423,258	0,7696	549,8836	0,9998	549,979	0,99996
600	462,816	0,7714	599,8848	0,9998	599,9794	0,99997
650	502,281	0,7727	649,8846	0,9998	649,9792	0,99997
700	541,842	0,774	699,8849	0,9998	699,9794	0,99997
750	581,13	0,775	749,8824	0,9998	749,979	0,99997
800	621,024	0,7763	799,8846	0,9999	799,9795	0,99997
850	660,654	0,777	849,8845	0,9999	849,9745	0,99997
900	700,434	0,7783	899,885	0,9999	899,9799	0,99998
950	740,088	0,779	949,8845	0,9999	949,9794	0,99998
1000	779,88	0,7799	999,885	0,9999	999,9795	0,99998

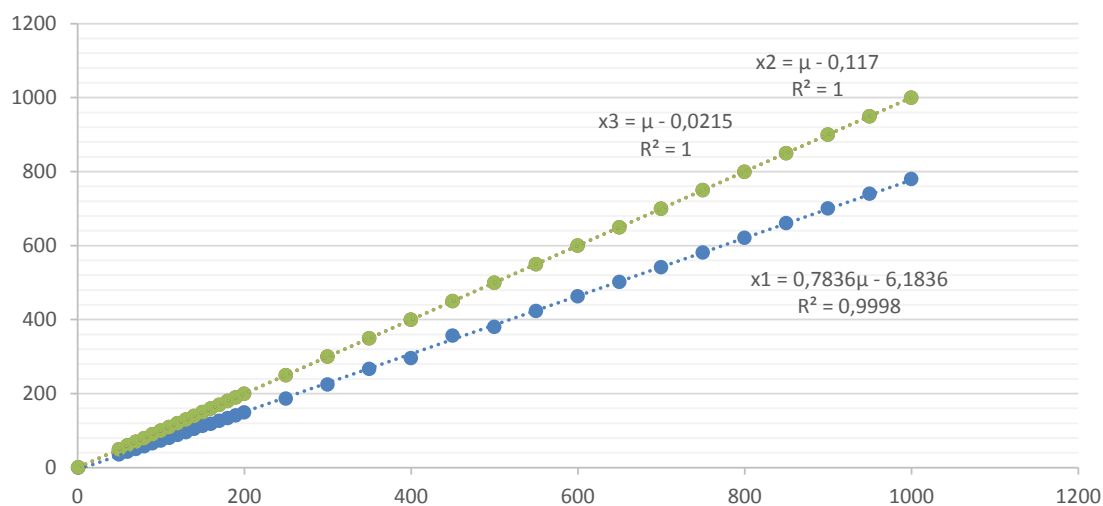


Рис. 3. Графики зависимостей точек касания от интенсивности трафика

Заключение

Линейный характер зависимости точек касания от интенсивности обслуживания говорит о том, что значение точек аппроксимации зависит не столько от скорости канала связи, как от его загрузки, при этом для точки x_1 , наблюдаются небольшие отклонения от линейной зависимости, но с ростом пропускной способности эта зависимость становится линейной. Это обусловлено тем,

что характер зависимости времени ожидания имеет более протяженный пологий участок с ростом интенсивности обслуживания.

Использование всего лишь трех точек для аппроксимации функции среднего времени ожидания достаточно точно описывает оригинальный график. На основании проведенных исследований также можно выдвинуть предположение, что в реальных условиях, когда статистические характеристики трафика отличаются от экспоненциаль-

ных распределений длительности обслуживания и интервалов между вызовами, для удовлетворительной аппроксимации вероятностно-временных характеристик достаточно провести всего лишь три измерения при нагрузках 0,77, 0,999 и 0,9999. Для более точной же аппроксимации можно воспользоваться данной методикой для определения большего числа точек, в которых необходимо проводить измерения.

Также необходимо отметить, что переход на кусочно-линейную аппроксимацию хоть и ре-

шает проблему устранения разрыва функции, но также приводит и к ряду других проблем, а именно к выбору метода поиска экстремальных значений функций, которые получаются как линейная комбинация и суперпозиция таких функций, т. к. такая задача становится задачей дискретного программирования. Пока же отметим, что в среде MathCAD, даже при использовании стандартной функции *minimize*, которая использует квази-ньютоновский метод поиска минимума функции, получается небольшой выигрыш при вычислении.

Список литературы

- [1] Галлагер Р., Бертсекас Д. Сети передачи данных. М. : Мир, 1989. 544 с.
- [2] Крон Г. Тензорный анализ сетей : учеб. пособие. М. : Сов. радио, 1978. 720 с.
- [3] Парфенов В. И., Золотарев С. В. Об одном алгоритме решения задачи оптимальной маршрутизации по критерию средней задержки // Вестник ВГУ: сер. Физика. Математика. 2007. № 2. С. 28–32.
- [4] Пономарев Д. Ю., Гаипов К. Э., Подойницына О. И., Шиянов Е. А. Определение целевой функции для решения задачи оптимального распределения трафика тензорным методом // Труды Международной научно-технической конференции «Современные информационные технологии». Пенза. Пензенская государственная технологическая академия. 2009.
- [5] Пономарев Д. Ю. О подходе к анализу сетей массового обслуживания с использованием тензорной методологии // Труды V Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO '06. М. Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН. 2006.
- [6] Пономарев Д. Ю. Тензорный метод для телекоммуникационных сетей // Труды КГТУ. 2006. № 2–3.
- [7] Вишневский В. М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. М. : Техносфера, 2003. 512 с.
- [8] Березко М. П., Вишневский В. М., Левнер Е. В., Федотов Е. В. Математические модели исследования маршрутизации в сетях передачи данных // Информационные процессы. 2001. Т. 1. № 2. С. 103–125.
- [9] Вержбицкий В. М. Основы численных методов : учеб. М. : Директ-Медиа, 2013. 847 с.
- [10] Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. М. : Гос. издание физико-математической литературы, 1962. 352 с.

APPLICATION OF PIECEWISE-LINEAR APPROXIMATION OF PROBABILISTIC-TIME CHARACTERISTICS OF QUEUING SYSTEMS

I. L. Krikunov, K. E. Gaipov

*Siberian Federal University,
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Nowadays many modern industries depend on satellite technologies to a greater or lesser extent. To build such satellite communication systems it is necessary to have estimated parameters of high service quality, one including the information delay time. To implement a mathematical model of traffic distribution in a satellite network, such analytical expressions for time delays are used, which have a discontinuity of the second kind at the moment when the arrival rate becomes equal to the service rate. Removal of this discontinuity can reduce the time required for calculating optimal routes. To achieve this goal, a piecewise linear approximation is used. As a way of specifying line segments, two approaches are considered, which are compared using

the integral least squares method and the issue of the number of lines used in the conditions of the problem is also considered. As a result, approximation dependences were obtained, which allows plotting a piecewise-linear function of the mean waiting time in the buffer for the M/M/1 system. The procedure for finding the optimal parameters for this function is described and the analytical method was used to obtain approximate formulas for finding the tangency points of depending on the incoming traffic intensity.

Keywords: satellite channel, optimal routing, objective function, piecewise-linear approximation.

References

- [1] Gallagher R., Bertsekas D. *Seti peredachi dannyh* [Data transmission networks]. Moscow, Mir, 1989, 544 p. (In Russian)
- [2] Kron G. *Tenzornyy analiz setej* [Tensor analysis of networks]. Moscow, Sov. radio, 1978, 720 p. (In Russian)
- [3] Parfenov V. I., Zolotarev S. V. *Ob odnom algoritme resheniya zadachi optimal'noj marshrutizatsii po kriteriyu srednej zaderzhki* [On one algorithm for solving the problem of optimal routing by the criterion of the average delay] // *Vestnik VSU: Physics. Mathematics*, 2007, no. 2, pp. 28–32. (In Russian)
- [4] Ponomarev D. Yu., Gaipov K. E., Podoinitsyna O. I., Shiyanov E. A. *Opredelenie celevoj funktsii dlya resheniya zadachi optimal'nogo raspredeleniya trafika tenzornym metodom* [Determination of the objective function for solving the problem of optimal traffic distribution by the tensor method] // *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference «Modern information technologies»*, Penza, Penza State Technological Academy, 2009. (In Russian)
- [5] Ponomarev D. Yu. *O podhode k analizu setej massovogo obsluzhivaniya s ispol'zovaniem tenzornoj metodologii* [On the approach to the analysis of queuing networks using tensor methodology] // *Proceedings of the V International Conference «Identification of systems and control problems» SICPRO '06*, Moscow, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, 2006.
- [6] Ponomarev D. Yu. *Tenzornyy metod dlya telekommunikatsionnyh setej* [Tensor method for telecommunication networks] // *Proceedings of KSTU*, 2006, no. 2–3. (In Russian)
- [7] Vishnevsky V. M. *Teoreticheskie osnovy proektirovaniya komp'yuternykh setej* [Theoretical foundations for the design of computer networks]. Moscow, Technosphere, 2003, 512 p. (In Russian)
- [8] Berezhko M. P., Vishnevsky V. M., Levner E. V., Fedotov E. V. *Matematicheskie modeli issledovaniya marshrutizatsii v setyah peredachi dannykh* [Mathematical models for the study of routing in data transmission networks] // *Information Processes*, 2001, vol. 1, no. 2, pp. 103–125. (In Russian)
- [9] Verzhbitskiy V. M. *Osnovy chislennykh metodov* [Foundations of numerical methods]. Moscow, Direct-Media, 2013, 847 p. (In Russian)
- [10] Linnik Yu. V. *Metod naimen'shih kvadrats i osnovy teorii obrabotki nablyudenij* [The method of least squares and the foundations of the theory of observational processing]. Moscow, State publication of physical and mathematical literature, 1962, 352 p. (In Russian)

Сведения об авторах

Гаипов Константин Эдуардович – кандидат технических наук, доцент базовой кафедры инфокоммуникаций Сибирского федерального университета. Область научных интересов: методы управления трафиком, технологии QoS.

Крикунов Илья Леонидович – аспирант базовой кафедры инфокоммуникаций Сибирского федерального университета. Окончил магистратуру Сибирского федерального университета в 2020 году. Область научных интересов: методы управления трафиком, технологии QoS.

ORCID: 0000-0001-6749-6942

ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТР ДЛЯ УСТРОЙСТВА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКА РАДИОСИГНАЛА В СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМАХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

В. В. Сухотин[✉], А. С. Тихтенко, А. В. Жгун, В. А. Сидорин

*Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск, Российская Федерация*

Работа посвящена исследованиям зависимости мощности сигнала, который будет использован в измерениях разности фаз и шумовых составляющих сигнала, от типа цифрового фильтра и его параметров при различных соотношениях сигнал/шум. Дано обоснование актуальности исследований, которая состоит в поиске возможности применения цифровых фильтров для устройства определения координат источника радиосигнала в спутниковых телекоммуникациях, обеспечивающего минимальную погрешность измерения разности фаз. Приведена структура системы определения координат источника радиосигнала. Приведена разработанная компьютерная модель и ее описание. Рассмотрены указанные выше исследования для цифровых рекурсивных полосно-пропускающих фильтров типа Баттерворта, Чебышева 1 рода, Чебышева 2 рода, Золотарева-Кауэра, которые задаются с помощью дискретной линейной системы. Сделаны соответствующие выводы о применимости цифровых фильтров в устройстве определения координат. Определены типы фильтров и предъявлены требования для обеспечения минимальной погрешности измерения разности фаз.

Ключевые слова: цифровой полосно-пропускающий фильтр, устройство определения координат, источник радиосигнала, рекурсивный фильтр, компьютерная модель, спутниковая система телекоммуникаций, отношение сигнал/шум.

Введение

Спутниковые телекоммуникации глубоко проникли в повседневную жизнь как любого человека, так и предприятий. Искусственные спутники Земли (ИСЗ), расположенные на геостационарной орбите, обеспечивают ретрансляцию терабайтных потоков данных между абонентами, расположенными как на поверхности Земли, так и в околоземном пространстве. Доступность и открытость ИСЗ позволяет использовать нелегитимно его частотный ресурс. Очень много публикаций посвящено данной тематике. В частности, одним из способов борьбы с данной проблемой является определение координат постановщика помех [1], являющееся самостоятельной частью основной проблемы защиты спутниковых телекоммуникаций от нелегитимного использования.

Обобщенная структурная схема системы определения координат источника радиосигнала (ИРС), расположенного на земной поверхности, представлена на рис. 1.

Очень важным элементом данной системы является устройство определения координат ИРС, в состав которого входят: аналого-цифровой преобразователь (АЦП), полосно-пропускающий фильтр (Ф), устройство выборки и хранения (УВиХ), измеритель разности фаз и вычислительное устройство (ВУ).

Для вычисления координат ИРС используется фазовый метод пеленгации [1; 2]. Погрешность измерения разности фаз сигналов [3], принятых в различные промежутки времени от ИСЗ, зависит от стабильности частоты принятого сигнала, структуры сигнала (его спектра), отношения сигнал/шум, погрешности квантования и т. д.

Точность измерения разности фаз существенно зависит от отношения сигнал/шум на входе измерителя разности фаз. Высокая точность измерения (абсолютная погрешность на уровне $0,1^\circ$) обеспечивается только при отношении сигнал/шум не менее 50–60 дБ [4; 5], вследствие чего исследуем возможность применения различных типов цифровых фильтров для обеспечения минимальной погрешности измерения разности фаз.

[✉] vsuhotin@sfu-kras.ru

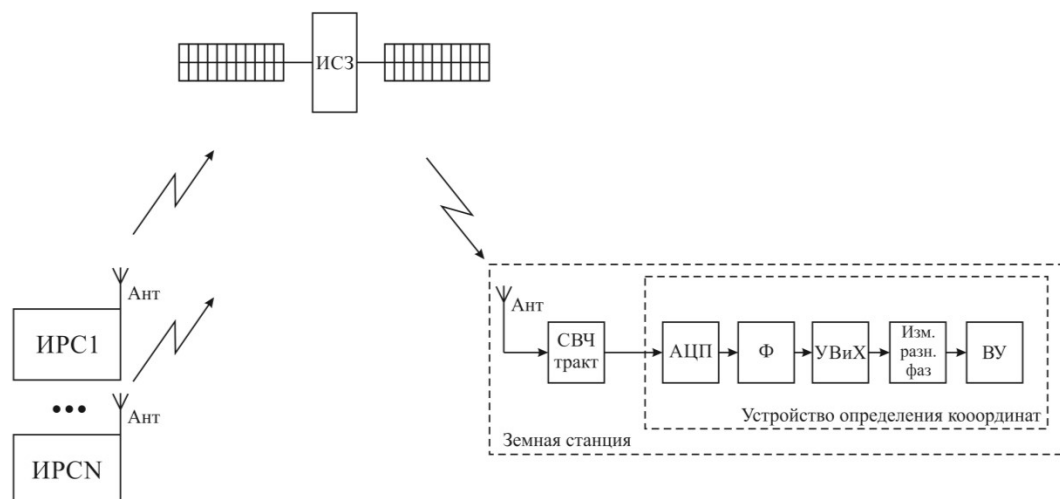


Рис. 1. Обобщенная структурная схема системы определения координат ИРС

1. Компьютерная модель

Для исследования цифровых фильтров была разработана компьютерная модель в системе MATLAB [6; 7] с использованием библиотеки FDATool.

Исходными данными для разработки явились:

- сигнал на входе – 10 гармонических синусоидальных сигналов, отстоящих по частоте от 500 кГц до 1,4 МГц и одинаковой амплитуды, равной 1 В, где полезный сигнал, используемый для измерения разности фаз, формируется на частоте 1 МГц, а остальные являются шумовыми и частоты которых равны от 500 кГц до 1,4 МГц;
- аддитивный белый шум на входе, создающий сигнал заданной мощности, модельное время выбрано равным величине шага дискретизации по времени – 10 мкс;
- отношение сигнал/шум – от 0 до 20 дБ;
- центральная частота фильтра – 1 МГц;

- полоса пропускания – от 100 Гц до 1 кГц;
- коэффициент подавления в полосе пропускания – 1 дБ;
- коэффициент подавления в полосе задерживания – 60 дБ.

Вид исследуемой компьютерной модели приведен на рис. 2.

В состав модели вошли:

- 10 источников синусоидального сигнала с частотами от 500 кГц до 1,4 МГц;
- 9 сумматоров;
- блок дискретизации сигнала во времени;
- блок квантования по уровню;
- генератор белого шума;
- цифровой рекурсивный фильтр;
- анализатор спектра и осциллограф на выходе модели.

В данной схеме при помощи 10 источников синусоидального сигнала и сумматоров формируется сложный сигнал, который проходит дальнейшую дискретизацию во времени и квантование по

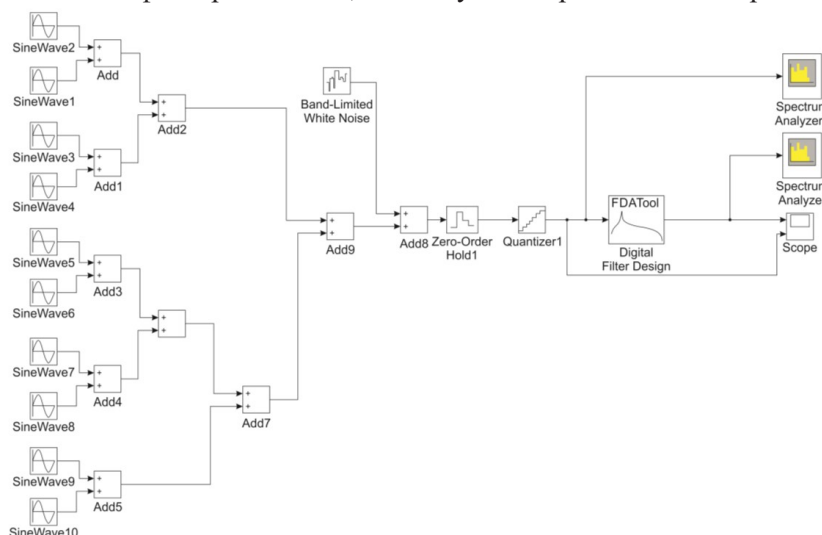


Рис. 2. Компьютерная модель для исследования фильтра

уровню. Суммируясь с источником белого шума, после оцифровки, полученный сигнал поступает на цифровой фильтр, где проходит обработку, и результат обработки отображается на анализаторе спектра и осциллографе [6–8].

2. Исследования

Для исследования были взяты 4 цифровых рекурсивных полосно-пропускающих фильтра типа Баттерворта, Чебышева 1 рода, Чебышева 2 рода, Золотарева-Кауэра, которые задаются с помощью дискретной линейной системы [9].

Зависимости и анализ влияния параметров выходного сигнала от типа фильтра, его параметров и отношения сигнал/шум приведены ниже.

В модели для исследования фильтров задавались следующие параметры:

- центральная частота фильтра – 1 МГц;
- полоса пропускания – от 100 Гц до 1 КГц;
- коэффициент подавления в полосе пропускания – 1 дБ;
- коэффициент подавления в полосе задерживания – 60 дБ.

По заданным параметрам были получены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) фильтров с соответствующими полосами и частотами срезов.

Отношение сигнал/шум на выходе имеет следующую формулу:

$$SNR = \frac{P_{с.вых}}{P_{ш.вых}}$$

Так как все составляющие выражены в децибелах, то формула может быть упрощена до [10]:

$$SNR_{dB} = P_{с.вых\,dB} - P_{ш.вых\,dB}$$

2.1. Фильтр Чебышева 2 рода

Фильтр Чебышева 2 рода является фильтром, который обладает крутым спадом АЧХ. У этого фильтра отсутствуют пульсации на частотах в полосе пропускания, но присутствуют существенные пульсации на частотах полосы подавления [11].

Графики зависимостей мощности исследуемого сигнала на выходе от отношения сигнал/шум представлены на рис. 3 и 4.

АЧХ фильтра Чебышева 2 рода имеет вид:

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \frac{1}{\varepsilon^2 T_N^2 \omega}}$$

где ε – параметр, управляющий величиной пульсации; T_N – полином Чебышева N -го порядка, ω – частота.

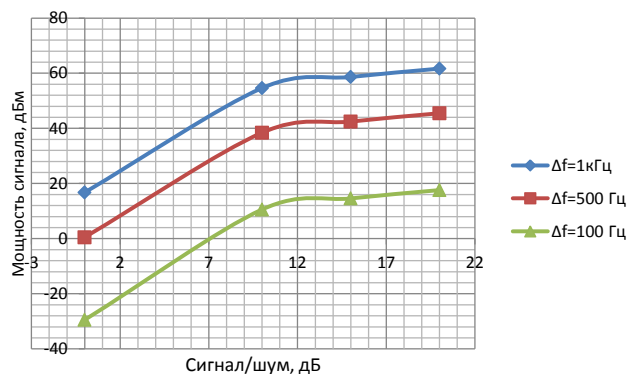


Рис. 3. Зависимость мощности выходного исследуемого сигнала от отношения сигнал/шум на выходе фильтра Чебышева 2 рода для различных полос пропускания

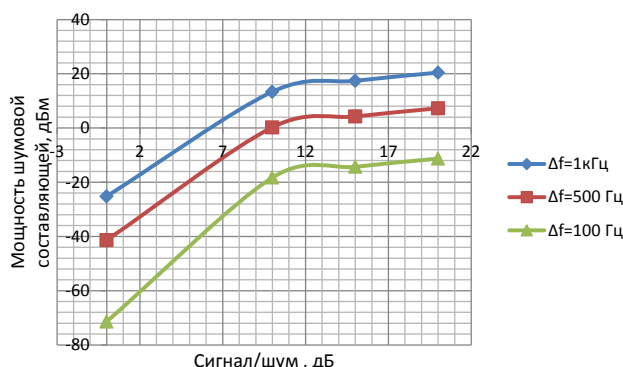


Рис. 4. Зависимость мощности шумовой составляющей выходного сигнала от отношения сигнал/шум на выходе фильтра Чебышева 2 рода для различных полос пропускания

Исходя из графиков, можно сделать вывод, что для цифрового фильтра (ЦФ) Чебышева 2 рода с увеличением полосы пропускания фильтра от 100 Гц до 1 кГц возрастает мощность выходного исследуемого сигнала на частоте 1 МГц. При полосе пропускания 1 кГц значение мощности сигнала равно 60 дБм, значение шумовой составляющей равно 20 дБм. Для полосы пропускания 100 Гц значение мощности сигнала равно 18 дБм, значение шумовой составляющей равно -16 дБм при отношении сигнал/шум 20 дБ.

2.2. Фильтр Чебышева 1 рода

Фильтр Чебышева 1 рода является фильтром, который обладает более крутым спадом АЧХ, нежели фильтр Чебышева 2 рода, а также обладает существенными пульсациями АЧХ на частотах полосы пропускания [11].

АЧХ фильтра Чебышева 1 рода имеет вид:

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 T_N^2 \omega}$$

Графики зависимостей мощности исследуемого сигнала на выходе от отношения сигнал/шум представлены на рис. 5 и 6.

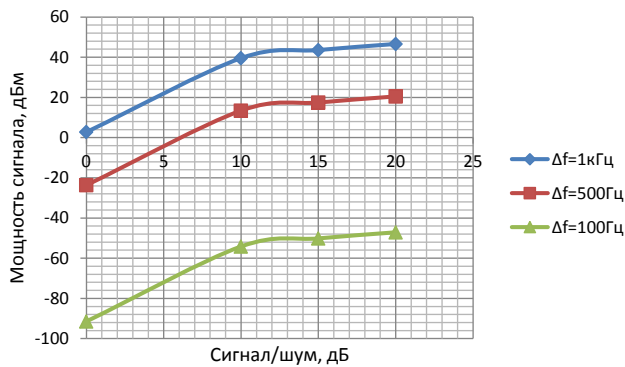


Рис. 5. Зависимость мощности выходного исследуемого сигнала от отношения сигнал/шум на выходе фильтра Чебышева 1 рода для различных полос пропускания

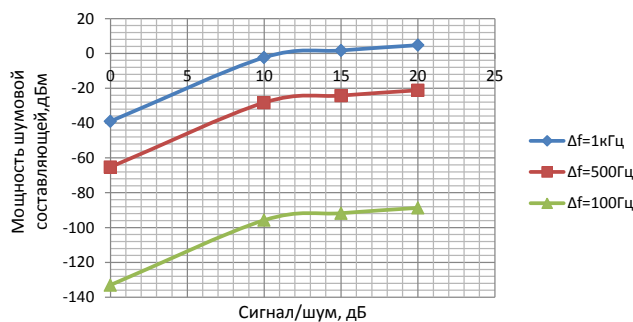


Рис. 6. Зависимость мощности шумовой составляющей выходного сигнала от отношения сигнал/шум на выходе фильтра Чебышева 1 рода для различных полос пропускания

Таким образом, графики показывают, что для ЦФ Чебышева 1 рода с увеличением полосы пропускания фильтра от 100 Гц до 1 кГц возрастает мощность выходного исследуемого сигнала на центральной частоте 1 МГц. При полосе пропускания 1 кГц значение сигнала равно 48 дБм, значение шумовой составляющей равно 4 дБм. Для полосы пропускания 100 Гц значение сигнала равно -48 дБм, значение шумовой составляющей равно -88 дБм при отношении сигнал/шум 20 дБ.

2.3. Фильтр Золотарева-Кауэра

Фильтр Золотарева-Кауэра или эллиптический фильтр – это цифровой фильтр с пульсациями АЧХ как в полосе пропускания, так и в полосе подавления.

АЧХ фильтра Золотарева-Кауэра имеет вид:

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 U_N^2 \omega},$$

где U_N – эллиптическая функция Якоби N -го порядка.

Графики зависимостей мощности исследуемого сигнала на выходе от отношения сигнал/шум представлены на рис. 7 и 8.

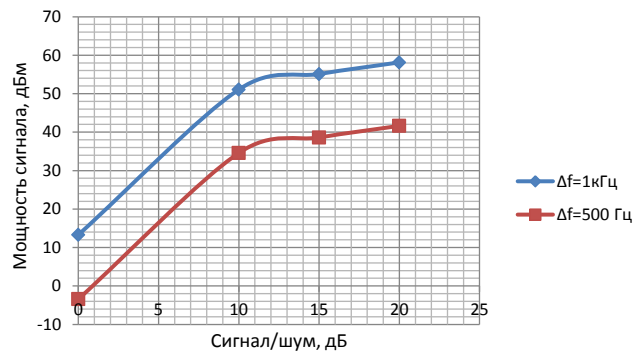


Рис. 7. Зависимость мощности выходного исследуемого сигнала от отношения сигнал/шум на выходе фильтра Золотарева-Кауэра для различных полос пропускания

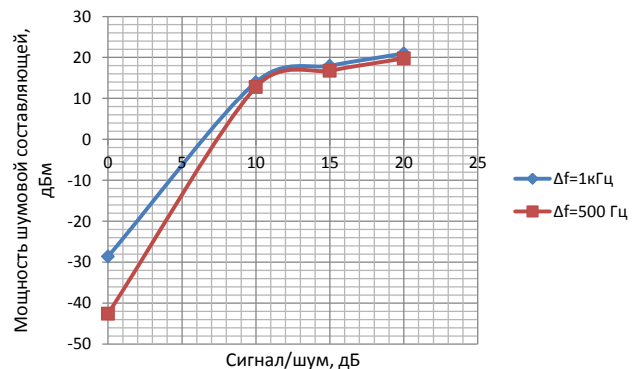


Рис. 8. Зависимость мощности шумовой составляющей выходного сигнала от отношения сигнал/шум на выходе фильтра Золотарева-Кауэра для различных полос пропускания

Из графиков видно, что для ЦФ Золотарева-Кауэра с увеличением полосы пропускания фильтра от 100 Гц до 1 кГц возрастает мощность исследуемого сигнала на центральной частоте 1 МГц. При полосе пропускания 1 кГц значение сигнала равно 58 дБм, значение шумовой составляющей равно 18 дБм. Для полосы пропускания 500 Гц значение сигнала равно 42 дБм, значение шумовой составляющей равно значению на частоте 1 кГц и составляет также 18 дБм при отношении сигнал/шум 20 дБ.

2.4. Фильтр Баттерворта

Фильтр Баттерворта способен обеспечить наиболее плоскую АЧХ в полосе пропускания. Это достигается за счет «плавности» характеристики между полосой пропускания и полосой задерживания [12].

АЧХ фильтра Баттерворта имеет вид:

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \omega^{2N}},$$

где ω – частота среза.

Графики зависимостей мощности исследуемого сигнала на выходе от отношения сигнал/шум представлены на рис. 9 и 10.

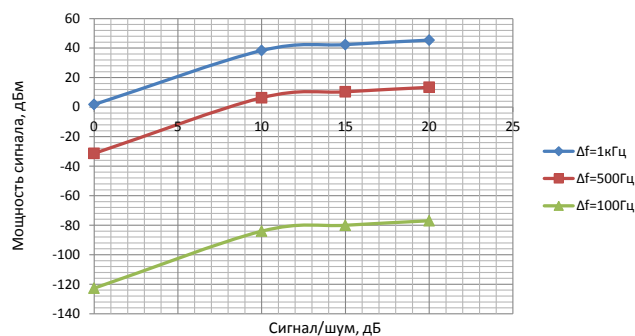


Рис. 9. Зависимость мощности выходного исследуемого сигнала от отношения сигнал/шум на выходе фильтра Баттерворта для различных полос пропускания

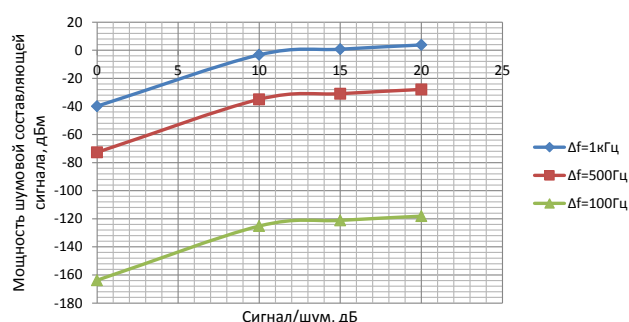


Рис. 10. Зависимость мощности шумовой составляющей выходного сигнала от отношения сигнал/шум на выходе фильтра Баттерворта для различных полос пропускания

Из графиков можно заметить, что для ЦФ Баттерворта с увеличением полосы пропускания от 100 Гц до 1 кГц возрастает мощность сигнала на частоте 1 МГц. При полосе пропускания 1 кГц значение сигнала равно 40 дБм, значение шумовой составляющей равно 4 дБм. Для полосы пропускания 100 Гц значение сигнала равно -76 дБм, значение шумовой составляющей равно -120 дБм при отношении сигнал/шум 20 дБ.

По результатам исследований всех 4 ЦФ можно сделать следующие выводы:

- наибольшее значение мощности сигнала на выходе фильтра при полосе пропускания 1 кГц имеет фильтр Чебышева 2 рода и равно 60 дБм при отношении сигнал/шум 20 дБ;
- наименьшее значение мощности шумовой составляющей сигнала на выходе фильтра при полосе пропускания 1 кГц имеет фильтр

Баттерворта и равно -120 дБм при отношении сигнал/шум 20 дБ;

- отношение сигнал/шум на выходе наибольшее у ЦФ Чебышева 1 рода при 1 кГц и составляет 44 дБм при отношении сигнал/шум 20 дБ.
- отношение сигнал/шум на выходе наибольшее у ЦФ Баттерворта при 100 Гц и составляет 44 дБм при отношении сигнал/шум 20 дБ.

Сделанные выводы говорят о том, что наибольшее отношение сигнал/шум на входе измерителя разности фаз, равное 44 дБм, может быть обеспечено с использованием фильтра Баттерворта с полосой пропускания 100 Гц или фильтра Чебышева 1 рода с полосой пропускания 1 кГц с параметрами:

- центральная частота фильтра – 1 МГц;
- коэффициент подавления в полосе пропускания – 1 дБ;
- коэффициент подавления в полосе задерживания – 60 дБ.

Используем формулу [5]:

$$\Delta\phi_{\text{погр}} = 360 \cdot$$

$$\left(\delta f_{\text{ог}} + \frac{f_{\text{пр}}}{\sqrt{6} \cdot f_{\text{ог}}} + \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot 10^{\frac{H_{\text{пр}}}{20}}} \right) [\text{град}],$$

где $\delta f_{\text{ог}}$ – относительная нестабильность частоты местного опорного генератора; $f_{\text{ог}}$ – частота местного опорного генератора; $f_{\text{пр}}$ – промежуточная частота; $H_{\text{пр}}$ – отношение сигнал/шум на входе измерителя разности фаз. Задав значения $\delta f_{\text{ог}} = 10^{-8}$ и $f_{\text{ог}} = 10$ МГц, и подставив их вместе со значениями $H_{\text{пр}} = 44$ дБм и $f_{\text{пр}} = 1$ МГц в формулу (1), мы получим $\Delta\phi_{\text{погр}} = 0,6^\circ$.

Заключение

Из четырех исследованных фильтров обеспечение погрешности измерения разности фаз, равную $0,6^\circ$, возможно достичь только с применением фильтра Баттерворта с полосой пропускания 100 Гц или фильтра Чебышева 1 рода с полосой пропускания 1 кГц. Для этого необходимо выполнение условий увеличения частоты местного опорного генератора и уменьшения промежуточной частоты, что приведет к высокоточным измерениям разности фаз, о которых говорилось в [4; 5].

Список литературы

- [1] Panko S. P., Sukhotin V. V., Ryabushkin S. A. Satellite Infocommunications Protection against Unauthorized Use // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. vol. 11. no. 3. pp. 1739–1745.
- [2] Kalashnikova A. S., Sukhotin V. V. Consideration of Methods to Protect Frequency Resources of Satellite System Against Unauthorized Access // Proceedings of 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Omsk. Omsk State Technical University. 2015. doi: 10.1109/SIBCON.2015.7147083.

- [3] Сухотин В. В., Овчинников Ф. В. Метод измерения разности фаз между некогерентными сигналами // Успехи современной радиоэлектроники. 2017. № 12. С. 93–96.
- [4] Саидов А. С., Тагилаев А. Р., Алиев Н. М., Асланов Г. К. Проектирование фазовых автоматических пеленгаторов. М. : Радио и связь, 1997. 160 с.
- [5] Дамдинова Д. Б., Полетаев А. С., Ченский А. Г. Сравнение точности методов вычисления разности фаз квазигармонических сигналов // Вестник СибГУТИ. 2016. № 2. С. 87–97.
- [6] Проектирование цифровых фильтров в системе MATLAB / Simulink и САПР ПЛИС Quartus [Электронный ресурс]. URL: https://www.kit-e.ru/articles/cad/2008_6_122.php (дата обращения: 11.09.2020).
- [7] Солонина А. Моделирование цифровой обработки сигналов ЦОС в Matlab. Часть 2. Синтез оптимальных БИХ-фильтров программными средствами Matlab // Компоненты и Технологии. 2008. № 12. С. 129–132.
- [8] Стучинская М. М. Выбор фильтровой характеристики устройства режекции помехи и анализ работы устройства защиты // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2018. № 7. С. 126–134.
- [9] Глинченко А. С. Цифровая обработка сигналов : учеб. пособие. 2-е изд. перераб. и доп. Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2005. 482 с.
- [10] Отношение сигнал/шум [Электронный ресурс]. URL: <http://masters.donntu.org/2014/frt/atarov/library/article5.htm> (дата обращения: 11.09.2020).
- [11] Фонарь Л. С. Моделирование динамического коэффициента передачи цифровых фильтров Чебышева // Вестник Херсонского национального технического университета. 2017. Т. 1. № 3 (62). С. 248–251.
- [12] Щербина Ю. В., Зуева Е. Б. Методика проектирования цифровых фильтров Баттерворта средствами пакета MathCAD // Вестник Московского государственного университета печати. 2011. № 1. С. 67–74.
- [13] Арсентьев В. Г., Криволапов Г. И. Способ измерения разности фаз гармонических сигналов на выходах линейных трактов с малыми отношениями сигнал/шум. Пат. № 2700334, Российская Федерация, 2019, бюл. № 26.

DIGITAL FILTER FOR DEVICE OF DETERMINING COORDINATES OF RADIO SIGNAL SOURCE IN SATELLITE TELECOMMUNICATIONS SYSTEMS

V. V. Sukhotin, A. S. Tikhtenko, A. V. Zhgun, V. A. Sidorin

Siberian Federal University,
Krasnoyarsk, Russian Federation

Work is devoted research of signal power dependence that will be used in the measurements and noise components of the signal from the digital filter type, filter parameters for various signal-to-noise ratios. The substantiation of the relevance of research is given, which consists in finding the possibility of using digital filters for a device for determining the coordinates of a radio signal source in satellite telecommunications, providing a minimum error in measuring the phase difference. The structure of the system for determining the coordinates of the radio signal source is given. The developed computer model and its description are presented. The researchers are considered for digital recursive band-pass filters of the Butterworth, Chebyshev type 1, Chebyshev type 2, Zolotarev-Cauer type, which are specified using a discrete linear system. Appropriate conclusions are drawn about the applicability of digital filters in the device for determining coordinates. The types of filters are determined and requirements are presented to ensure the minimum error in measuring the phase difference.

Keywords: digital band-pass filter, coordinate detection device, radio signal source, recursive filter, computer model, satellite telecommunications system, signal-to-noise ratio.

References

- [1] Panko S. P., Sukhotin V. V., Ryabushkin S. A. Satellite Infocommunications Protection against Unauthorized Use // International Journal of Applied Engineering Research, 2016, vol. 11, no. 3, pp. 1739–1745.

- [2] Kalashnikova A. S., Sukhotin V. V. Consideration of Methods to Protect Frequency Resources of Satellite System Against Unauthorized Access // Proceedings of 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Omsk, Omsk State Technical University, 2015. doi: 10.1109/SIBCON.2015.7147083.
- [3] Sukhotin V. V., Ovchinnikov F. V. *Metod izmereniya raznosti faz mezhdu nekogerentnymi signalami* [Method for measuring the phase difference between incoherent signals] // Achievements of Modern Radioelectronics, 2017, no. 12, pp. 93–96. (In Russian)
- [4] Saidov A. S., Tagilaev A. R., Aliev N. M., Aslanov G. K. *Proektirovaniye fazovykh avtomaticheskikh pelengatorov* [Design of automatic phase direction finders]. Moscow, Radio and communication, 1997. 160 p. (In Russian)
- [5] Damdinova D. B., Poletaev A. S., Chenskiy A. G. *Sravneniye tochnosti metodov vychisleniya raznosti faz kvazigarmonicheskikh signalov* [Accuracy comparison of methods for calculating the phase difference of quasi-harmonic signals]. Vestnik SibGUTI, 2016, no. 2, pp. 87–97. (In Russian)
- [6] *Proektirovaniye cifrovyykh fil'trov v sisteme MATLAB / Simulink i SAPR PLIS Quartus* [Design of digital filters in MATLAB / Simulink and FPGA Quartus]. Available at: https://www.kit-e.ru/articles/cad/2008_6_122.php (accessed 11.09.2020). (In Russian)
- [7] Solonina A. *Modelirovaniye cifrovoy obrabotki signalov COS v Matlab. CHast' 2. Sintez optimal'nykh BIH-fil'trov programmnyimi sredstvami Matlab* [Modeling of digital processing of DSP signals in Matlab. Part 2. Synthesis of optimal IIR filters using Matlab software] // Components and Technologies, 2008, no. 12, pp. 129–132. (In Russian)
- [8] Stuchinskaya M. M. *Vybor fil'trovoj harakteristiki ustrojstva rezhekcii pomekhi i analiz raboty ustrojstva zashchity* [Selecting the filter characteristics of the interference rejection device and analyzing the operation of the protection device] // Air and space forces. Theory and practice, 2018, no. 7, pp. 126–134. (In Russian)
- [9] Glinchenko A. S. *Cifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing]. Krasnoyarsk, KSTU, 2005. 482 p. (In Russian)
- [10] Otnoshenie signal/shum [Signal to noise ratio]. Available at: <http://masters.donntu.org/2014/frt/atarov/library/article5.htm> (accessed 11.09.2020). (In Russian)
- [11] Fonar L. S. *Modelirovaniye dinamicheskogo koeffitsienta peredachi cifrovyykh fil'trov CHEbysheva* [Modeling of the dynamic transmission coefficient of digital Chebyshev filters] // Bulletin of the Kherson National Technical University, 2017, vol. 1, no. 3 (62), pp. 248–251. (In Russian)
- [12] Shcherbina Yu. V., Zueva E. B. *Metodika proektirovaniya cifrovyykh fil'trov Battervorta sredstvami paketa MathCAD* [Methodology for designing digital Butterworth filters using the MathCAD package] // Bulletin of the Moscow State University of Printing Arts, 2011, no. 1, pp. 67–74. (In Russian)
- [13] Arsentiev V. G., Krivolapov G. I. *Sposob izmereniya raznosti faz garmonicheskikh signalov na vihodah lineynykh traktov s malimi otnosheniyami signal/shum* [Method for measuring the phase difference of harmonic signals at the outputs of linear paths with small signal-to-noise ratios.]. Patent RU 2700334, 2019, bulletin no. 26.

Сведения об авторах

Жгун Александр Вячеславович – студент Сибирского федерального университета. Область научных интересов: радиоэлектроника, радиолокация радионавигация.

Сидорин Валерий Андреевич – лейтенант Вооруженных сил Российской Федерации. Окончил Сибирский федеральный университет в 2020 году. Область научных интересов: космическое приборостроение.

Сухотин Виталий Владимирович – кандидат технических наук, доцент Военно-инженерного института Сибирского федерального университета. Окончил Красноярский государственный технический университет в 1999 году. Область научных интересов: фазовые измерения, безопасность спутниковых информационных систем, пеленгация.

ORCID: 0000-0002-8166-5893

Тихтенко Анастасия Сергеевна – студент Сибирского федерального университета. Область научных интересов: радиоэлектроника, радиолокация радионавигация.

МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСАМИ ОКОЛОЛУННОГО СПУТНИКА ДЛЯ ПРОХОЖДЕНИЯ ТЕНЕВЫХ ЗОН БОЛЬШОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

В. Е. Чеботарев^{1, 2, 3}, Е. О. Воронцова^{1, 2} ✉

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

² Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск, Российская Федерация

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

Проведенные исследования возможностей создания лунной навигационно-связной системы выявили особенности освещенности Солнцем окололунных орбит: ежегодное прохождение орбит через продолжительный цикл длительностью около 55 суток, содержащих теневые участки орбиты от Луны и паузу до 185 суток с возможными наложениями на эти циклы полутеневых и теневых участков орбиты от Земли. При этом полутеневая и теневая зоны от Земли в районе Луны имеют существенные различия по размерам и могут покрывать всю орбитальную группировку лунной навигационно-связной системы. В результате возникает задача расчета энергоресурсов окололунного спутника для прохождения теневых зон большой длительности и поддержания теплового режима космических аппаратов на период прохождения теневых участков орбиты от Земли. Проведено моделирование энергобаланса космического аппарата для различных режимов его работы при прохождении теневых зон большой длительности: штатный, дежурный и режим хранения. Предлагается использовать жалюзи для регулирования теплового излучения с радиаторов космического аппарата при прохождении теневых участков орбиты в рассматриваемых режимах. Для снижения затрат массы космического аппарата рекомендуется переводить его в режим хранения, при котором уменьшается энергопотребление в сравнении с дежурным режимом. Эффективность предлагаемой схемы прохождения теневых зон космических аппаратов лунной навигационно-связной системы оценена для трех типоразмеров космического аппарата по критерию минимума суммы затрат массы на увеличение емкости аккумулятора торной батареи и установку жалюзи.

Ключевые слова: окололунный космический аппарат, орбита, теневой участок от Луны, теневой участок от Земли, емкость, аккумуляторная батарея, жалюзи.

Введение

Информационное обеспечение общества с использованием околоземных космических аппаратов (КА) является одной из обширных областей практического применения космонавтики. К информационным КА относятся: связные, навигационные и КА наблюдения, функционирующие в составе многоспутниковых орбитальных группировок (ОГ) в течение длительного промежутка времени (10 и более лет) [1; 8].

Решение задачи промышленного освоения Луны также обуславливает упреждающее развитие средств обеспечения связью и навигацией мобильных транспортных средств на поверхности Луны, а также космических средств в окололунном космическом пространстве. Проведенные исследования возможностей применения существующих наземных средств дальней связи и навигации выявили их ограниченность по зоне обслуживания, точности навигации и информативности. Поэтому возникает необходимость создания в перспективе на постоянной основе лунной навигационно-связной системы (ЛНСС) длительного функционирования (аналог околоземной).

✉ vorontsovaeco@iss-reshetnev.ru

© Ассоциация «ТП «НИСС», 2020

Однако при создании ЛНСС необходимо учитывать ряд особенностей [2–4]:

- отсутствие налунной инфраструктуры для управления, эфемеридно-временного и селенодезического обеспечения ЛНСС;
- отсутствие атмосферы и магнитосферы на Луне;
- большая длительность этапа выведения КА на окололунные орбиты;
- большая длительность теневых зон от Земли на окололунных орбитах искусственных спутников Луны (ИСЛ), сравнимой с длительностью периода обращения КА ЛНСС.

В данной работе представлена методика, обеспечивающая снижение затрат массы на реализацию мероприятий по обеспечению прохождения длительных циклов теневых орбит с зонами полутеневых и теневых участков от Земли и Луны переменной длительности [6; 9].

1. Характеристики теневых зон от Земли и Луны на окололунных орбитах

Вследствие движения Луны вокруг Земли и Земли вокруг Солнца положение Солнца относительно плоскости орбиты окололунного КА (условия освещенности) в течение года меняется, что приводит к необходимости расчета периодов появления теневых орбит, длительности теневых участков от Земли и Луны на отдельном витке и их взаимного положения. Анализ авторских исследований по моделированию и расчету экстремальных условий освещенности ОГ ЛНСС (орбиты с периодом обращения 7,52 ч) позволяет сформулировать номенклатуру показателей, описывающих эти условия [5–9].

1. Цикл наличия теневых орбит ИСЛ от затенения Луной имеет длительность 52–55 суток с паузой длительностью 185 суток. Максимальная длительность теневого участка орбиты от Луны (ТУЛ) для КА ЛНСС составляет $t_{\text{ТУЛ}}=0,95$ час, $K_{\text{ТУЛ}}=0,126$ (около 12,6 % от длительности витка $T_{\text{ИСЛ}}$).

2. Наличие затенения Землей орбиты ИСЛ возможно 1–2 раза в год, при этом возможно их наложение на теневые зоны от Луны.

3. Для многоплоскостных ОГ ЛНСС условия 1 и 2 могут реализоваться за годичный цикл для орбит ИСЛ из любой плоскости.

4. Возможны ежегодно две экстремальные схемы затенения орбит ИСЛ (рис. 1):

4.1. Схема 1 (циклограмма 1) – в паузе между циклами, содержащими ТУЛ (185 суток) появляется полутеневой участок орбиты от Земли (ПТУЗ): длительность ПТУЗ $t_{\text{ПТУЗ}} = 7,456$ час, длительность ТУЗ $t_{\text{ТУЗ}} = 5,255$ час.

4.2. Схема 2 (циклограмма 2) – на цикл, содержащий ТУЛ (55 суток), накладываются тене-

вые участки орбиты от Земли: длительность ПТУЗ $t_{\text{ПТУЗ}} = 5,42$ час; длительность ТУЗ $t_{\text{ТУЗ}} = 2,95$ час.

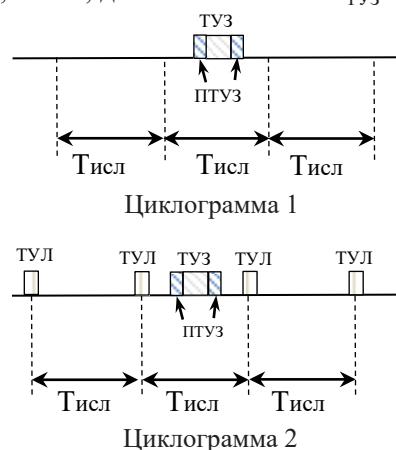


Рис. 1. Циклограммы прохождения ИСЛ теневых зон

5. Для расчета энергобаланса используется интегральный показатель затенения, учитывающий наличие ПТУЗ и ТУЗ: эквивалентная длительность тени от Земли (ЭТУЗ):

$$t_{\text{ЭТУЗ}} = t_{\text{ТУЗ}} + \Phi_{\text{ТУЗ}} (t_{\text{ПТУЗ}} - t_{\text{ТУЗ}}) \quad (1)$$

Используя (1) и принимая во внимание, что для ПТУЗ в районе Луны коэффициент фазы $\Phi_{\text{ТУЗ}}$ имеет значение $\approx 0,425$ [1], получим: эквивалентная длительность теневых участков орбиты ИСЛ от Земли $t_{\text{ЭТУЗ}} = 6,19$ час (вариант 1) и 4,00 час (вариант 2).

2. Методика обеспечения энергоресурсами окололунного спутника для прохождения теневых зон большой длительности

Для многоспутниковых ОГ типа ЛНСС допустимо на период появления экстремальных условий выводить КА из целевого использования, что облегчает задачу энергообеспечения нагрузки на этот период. Одновременно с этим изменяется тепловой режим КА, что обуславливает необходимость комплексного решения этой задачи (использовать жалюзи).

При анализе схем прохождения теневых зон большой длительности предлагается рассмотреть следующие режимы работы КА:

- штатный режим работы КА для случая прохождения только теневой зоны от Луны при штатном энергопотреблении нагрузки $P_{\text{Н.ср}}$ и отсутствии засветки радиаторов Солнцем;
- нерабочий режим с компенсирующим обогревом $P_{\text{об}}$ и с отсутствием засветки радиаторов Солнцем;
- дежурный режим работы КА при штатной ориентации, наличием частичного закрытия ради-

атора жалюзи и с дежурным энергопотреблением нагрузки $P_{Н.д}$;

- режим хранения КА с организацией грубой ориентации нормали к солнечной панели на Солнце, наличием полного закрытия радиатора жалюзи и с минимальным энергопотреблением $P_{хр}$.

Мощность солнечной батареи (СБ) и площадь радиатора во всех режимах сохраняются те же, что и в штатном режиме.

Эффективность предлагаемой схемы прохождения теневых зон КА ЛНСС предлагается оценивать по критерию минимума суммы затрат массы на реализацию мероприятий по обеспечению прохождения теневых зон большой длительности. К таким мероприятиям относятся: выбор энергоемкости аккумуляторной батареи (АБ) и площади жалюзи для регулирования теплового излучения с радиаторов КА. Остальные параметры системы электропитания (СЭП) и системы терморегулирования (СТР) мало зависят от выбранной схемы, поэтому не учитываются при расчете критерия.

3. Модель расчета параметров СЭП

В расчетах энергобаланса КА будем использовать следующую упрощенную модель [1].

Мощность СБ определяется из уравнения:

$$P_{СБ} = P_{Н.ср} \cdot \frac{K_{СБ}}{1 - K_{ТУЛ}}, \quad (2)$$

где $P_{Н.ср}$ – средняя мощность нагрузки в штатном режиме; $K_{СБ}$ – коэффициент преобразования энергии СБ в нагрузку, $K_{СБ} \approx 1,3$; $K_{ТУЛ}$ – коэффициент тени от Луны.

Разрядная энергия АБ определяется из уравнения:

$$W_{АБ} = P_{Н} \cdot K_{АБ} \cdot t_{Тр}, \quad (3)$$

где $K_{АБ}$ – коэффициент преобразования энергии АБ, $K_{АБ} \approx 1,40$; $P_{Н}$ – средняя мощность нагрузки в различных режимах; $t_{Тр}$ – длительность разряда при прохождении теневой зоны от Луны ($t_{Тр} = t_{ТУЛ}$) и Земли ($t_{Тр} = t_{ЭТУЗ}$).

В коэффициентах $K_{СБ}$ и $K_{АБ}$ заложен запас 5 %.

Расчеты разрядной энергии АБ проводятся для трех режимов работы КА.

Масса АБ определяется выражением [1]:

$$M_{АБ} = W_{АБ} / m_{аб.уд}, \quad (4)$$

где $m_{аб.уд}$ – удельная масса АБ, не менее 70 Вт·ч/кг.

4. Модель расчета параметров СТР

Расчет параметров СТР проведем для стационарного теплового баланса в двух предельных со-

стояниях радиатора КА: перегрева и переохлаждения при отсутствии засветки радиаторов Солнцем [1; 10; 11].

Для обоих состояний определяется допустимая площадь радиатора из уравнения Стефана-Больцмана:

$$F_{г} = \frac{P_{Н.г}}{q_{ир.г}}, \quad F_{х} = \frac{P_{Н.х}}{q_{ир.х}}, \quad (5)$$

где $q_{ир}$ – удельный тепловой поток, излучаемый с единичной поверхности в режиме перегрева ($q_{ир.г} = 290$ Вт/м²) и переохлаждения ($q_{ир.х} = 190$ Вт/м²).

Используя равенство $F_{г} = F_{х}$, получим формулу для расчета диапазона изменения мощности штатной нагрузки, при котором не требуется установка жалюзи:

$$\frac{P_{Н}}{P_{Н.г}} = \frac{q_{ир.х}}{q_{ир.г}} = 0,66. \quad (6)$$

При переводе КА в дежурный режим с меньшим энергопотреблением ($P_{Н.д}$) на период прохождения теневых зон от Земли большой длительности необходимо использовать жалюзи для экранирования части поверхности излучательного радиатора ($F_{ж}$):

$$F_{ж.д} = (F_{г} - F_{д}), \quad F_{д} = \frac{P_{Н.д}}{q_{ир.г}}. \quad (7)$$

Если на период прохождения теневых зон от Земли большой длительности КА переводить в режим хранения с выводом из штатной ориентации ($P_{х}$), то жалюзи должны экранировать всю поверхность радиатора ($F_{ж.х} = F_{г}$).

Масса всей системы жалюзи составит:

$$m_{ж} = m_{ж.уд} \cdot F_{ж} + n_{пр} \cdot m_{пр}, \quad (8)$$

где $m_{ж.уд}$ – удельная масса створок жалюзи, не более 3,7 кг/м²; $n_{пр}$, $m_{пр}$ – количество и масса приводов системы жалюзи, не более 1,5 кг.

5. Расчет характеристик СЭП и СТР КА ЛНСС с учетом прохождения теневых зон от Земли большой длительности

Рассмотрим три типоразмера космического аппарата ЛНСС [4; 9]:

- малоразмерный КА (МКА);
- среднеразмерный КА (СКА);
- большеразмерный КА (БКА).

Расчетные значения энергетических характеристик СЭП при прохождении циклограммы 1 для различного типоразмера КА приведены в табл. 1.

Используя полученные данные по СБ и АБ, проведем оценку допустимости их использования при прохождении циклограммы 2 и длительности пребывания КА в нештатном режиме (рис. 2–4).

Таблица 1

Энергетические характеристики СЭП

Тип КА	МКА	СКА	БКА
Потребляемая мощность КА в штатном режиме, Вт	660	1500	2300
Потребляемая мощность КА в дежурном режиме с компенсирующим обогревом, Вт	462	1050	1610
Потребляемая мощность КА в дежурном режиме, Вт	450	550	650
Потребляемая мощность КА в режиме хранения, Вт	300	320	400
Мощность СБ, Вт	982	2230	3420
Энергоемкость АБ для прохождения ТУЛ, Вт·ч	880	2000	3060
Энергоемкость АБ для прохождения ТУЗ (циклограмма 2), Вт·ч			
• в дежурном режиме с компенсирующим обогревом	4000	9100	14000
• в дежурном режиме	3900	4766	5633
• в режиме хранения	2600	2773	3466

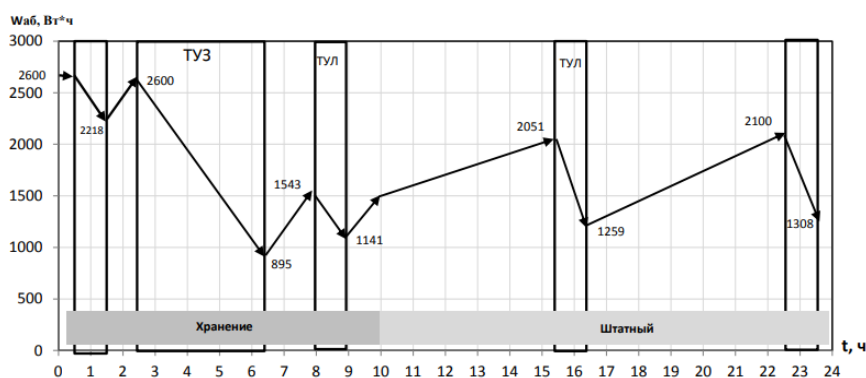


Рис. 2. Энергобаланс МКА

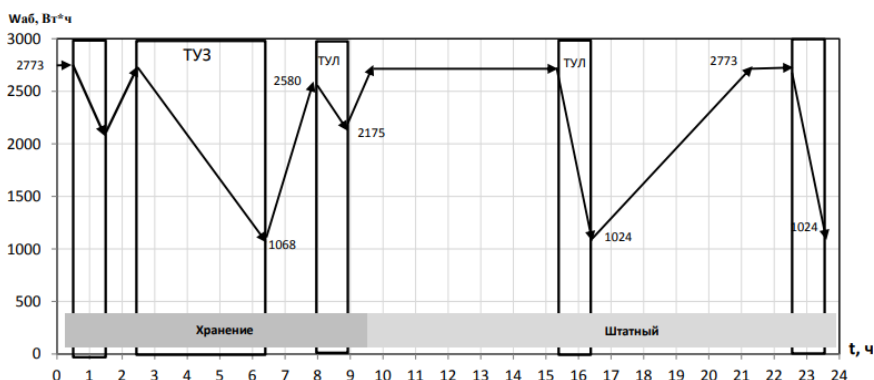


Рис. 3. Энергобаланс СКА

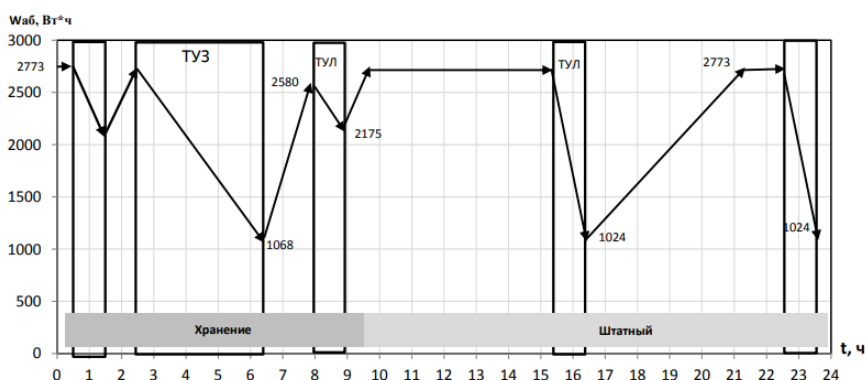


Рис. 4. Энергобаланс БКА

Анализ представленной в табл. 1 информации и графиков на рис. 2–4 позволяет сделать следующие выводы:

1. Перевод КА в режим пониженного потребления на период прохождения ТУЗ и использование жалюзи позволяет существенно уменьшить требуемую энергоемкость АБ.

2. Расчетные параметры СЭП, полученные из условия прохождения циклограммы 1, обеспечивают прохождение циклограммы 2 и восстановление энергобаланса за 10 ч.

3. Использование режима хранения на период прохождения ТУЗ предпочтительнее дежурного режима.

С использованием тепловой модели и приведенных исходных данных определим проектные характеристики СТР для трех типоразмеров КА (табл. 2).

Расчетные значения энерго-массовых характеристик для различных типоразмеров КА и вариантов прохождения теневых зон приведены в табл. 3.

Таблица 2

237

Проектные характеристики СТР

Тип КА	МКА	СКА	БКА
Потребление КА (штатное), Вт	660	1500	2300
Тепловыделение КА (штатное), Вт	610	1330	2070
Тепловыделение КА (дежурное), Вт	450	550	650
Тепловыделение КА (хранение), Вт	300	320	400
Площадь радиатора, м ²			
• штатный режим	2,1	4,5	7,0
• дежурный режим	2,1	2,9	3,4
• хранение	1,6	1,7	2,1
Площадь под жалюзи для прохождения ТУЗ, м ²			
• дежурный режим	0	1,6	2,6
• хранение	0,5	2,8	4,9
Площадь под жалюзи для прохождения участка выведения, м ²	2,1	4,5	7,0

Таблица 3

Энерго-массовые характеристики

Тип КА	МКА	СКА	БКА
1. Дежурный режим без жалюзи с компенсационным обогревом			
• энергоемкость АБ, Вт·ч	4000	9100	14000
• масса АБ, кг	57,2	130	200
• площадь жалюзи, м ²	—	—	—
• масса системы жалюзи, кг	—	—	—
• итоговая масса, кг	57,2	130	200
2. Дежурный режим с жалюзи			
• энергоемкость АБ, Вт·ч	3900	4766	5633
• масса АБ, кг	55,7	68,1	80,5
• площадь жалюзи, м ²	2,1	2,8	4,9
• масса системы жалюзи, кг	14,1	21,0	30,0
• итоговая масса, кг	69,8	89,1	110,5
3. Режим хранения с жалюзи			
• энергоемкость АБ, Вт·ч	2600	2773	3466
• масса АБ, кг	37,1	39,6	49,5
• площадь жалюзи, м ²	2,1	4,5	7,0
• масса системы жалюзи, кг	15,6	28,4	37,6
• итоговая масса, кг	52,7	68,0	87,1
4. Штатный режим, прохождение ТУЛ			
• энергоемкость АБ, Вт·ч	880	2000	3060
• доля масса АБ, %	33,4	72,1	88,3

Заключение

1. Сформированы условия и представлены две предельные циклограммы прохождения теневых зон с максимальной эквивалентной тенью от Земли 6,19 ч (циклограмма 1 – ТУЗ) и 4,0 ч (циклограмма 2 – ТУЛ и ТУЗ).

2. Разработана методика обеспечения энергоресурсами окололунного спутника для прохождения теневых зон большой длительности.

3. Проведены расчеты массовых затрат на прохождение теневых зон для различных типоразмеров КА и режимов его работы.

4. Подтверждена целесообразность использования жалюзи для экранирования поверхности излучательного радиатора на интервале теневых зон.

5. Использование режима хранения для прохождения теневых зон большой длительности существенно снижает затраты массы на обеспечение энергоресурсами.

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] Тестоедов Н. А., Косенко В. Е., Звонарь В. Д., Чеботарев В. Е. Концепция создания лунной информационно-навигационной обеспечивающей системы // Тез. докл. XIX Междунар. научн. конф. «Системный анализ, управление и навигация». Анапа. 2014.
- [3] Косенко В. Е., Звонарь В. Д., Чеботарев В. Е. Лунная информационно-навигационная обеспечивающая система / Актуальные вопросы проектирования АКА для фундаментальных и прикладных научных исследований. Химки, ФГУП «НПО имени С.А. Лавочкина», 2015. С. 323–329.
- [4] Чеботарев В. Е. Лунная информационно-навигационная обеспечивающая система // Научные технологии. 2018. Т. 19. № 12. С. 77–81.
- [5] Эльясберг П. Е. Введение в теорию полета искусственного спутника Земли. 2-е изд. М. : Либроком, 2011. 544 с.
- [6] Чеботарев В. Е. Теневые зоны орбит искусственного спутника Луны // Исследования наукограда. 2014. № 1. С. 12–18.
- [7] Казмерчук П. В., Мартынов М. Б., Москатиньев И. В., Сысоев В. К., Юдин А. Д. Космический аппарат «ЛУНА-25» – основа новых исследований Луны // Вестник «НПО имени С. А. Лавочкина». 2016. № 4 (34). С. 9–19.
- [8] Косенко В. Е., Попов В. В., Звонарь В. Д., Чеботарев В. Е. Анализ преемственности развития КА информационного обеспечения / Актуальные вопросы проектирования АКА для фундаментальных и прикладных научных исследований. Химки, ФГУП «НПО имени С. А. Лавочкина». 2017. Вып. 2. С. 132–140.
- [9] Чеботарев В. Е., Воронцова Е. О., Сидорова Е. А. Моделирование теневых зон на окололунных орбитах и особенности расчета параметров систем электропитания и терморегулирования окололунного космического аппарата // Решетневские чтения : материалы XXIV Междунар. науч.-практ. конф. Красноярск. 2020. Т. 1. С. 49–51.
- [10] Фортексю П., Суайнерд Г., Старк Д. Разработка систем космических аппаратов : пер. с англ. М. : Альпина Паблишер, 2015. 756 с.
- [11] Туманов А. В., Зеленцов В. В., Щеглов Г. А. Основы компоновки бортового оборудования космических аппаратов : учеб. пособие. М. : Моск. гос. техн. ун-т им. Н. Э. Баумана, 2010. 136 с.

METHOD OF PROVIDING ENERGY RESOURCES TO A CIRCULUNAR SATELLITE FOR PASSING LONG- DURATION SHADOW ZONES

V. E. Chebotarev^{1, 2, 3}, E. O. Vorontsova^{1, 2}

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

² Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

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

Researches of the possibilities of creating a lunar navigation and communication system have revealed features of the sun's illumination of near-lunar orbits: the annual passage of orbits through

a long cycle of about 55 days, containing shadow sections of the orbit from the Moon and a pause of up to 185 days with possible overlays of penumbra and shadow sections of the orbit from the Earth. At the same time, the penumbra and shadow zones from the Earth near the Moon have significant differences in size and can cover the entire orbital grouping of the lunar navigation and communication system. As a result, the problem arises of calculating the energy resources of a circumlunar satellite for passing long-duration shadow zones and maintaining the spacecraft's thermal regime for the period of passing the shadow section of the orbit from the Earth. The energy balance of the spacecraft is modeled for various modes of its operation during the passage of long-duration shadow zones: regular, duty, storage. It is proposed to use blinds to regulate the heat radiation from the spacecraft radiators when passing the shadow sections of the orbit in the considered modes. To reduce the cost of spacecraft mass it is recommended to switch the spacecraft to storage mode, which reduces power consumption in comparison with standby mode. The efficiency of the proposed scheme for passing the shadow zones of the lunar navigation and communication system spacecraft was evaluated for three spacecraft sizes according to the criterion – the minimum amount of mass spent on increasing the energy intensity of the battery and installing blinds.

Keywords: near-lunar spacecraft, orbit, shadow section from the Moon, shadow section from the Earth, energy intensity, battery, blinds.

References

- [1] Chebotarev V. E., Kosenko V. E. *Osnovy proektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya* [Fundamentals of spacecraft design information support]. Krasnoyarsk, SibSAU, 2011. 488 p. (In Russian)
- [2] Testodov N. A., Kosenko V. E., Zvonar V. D., Chebotarev V. E. *Koncepciya sozdaniya lunnoj informacionno-navigacionnoj obespechivayushchej sistemy* [The concept of creating a lunar information and navigation support system] // *Tezisy dokladov 19-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Sistemnyj analiz, upravlenie i navigaciya»* [Abstracts of the 19th International Scientific Conference «System analysis, management and navigation»]. Anapa, 2014. (In Russian)
- [3] Kosenko V. E., Zvonar V. D., Chebotarev V. E. *Lunnaya informacionno-navigacionnaya obespechivayushchaya sistema* [Lunar information and navigation support system] / *Aktual'nye voprosy proektirovaniya AKA dlya fundamental'nyh i prikladnyh nauchnyh issledovanij* [Actual problems of AKA design for fundamental and applied scientific research]. Khimki, FSUE «S. A. Lavochkina», 2015, pp. 323–329. (In Russian)
- [4] Chebotarev V. E. *Lunnaya informatsionno-navigatsionnaya obespechivayushchaya sistema* [Lunar information and navigation support system] // *Naukoemrie tekhnologie*, 2018, vol. 12, no. 19, pp. 77–81. (In Russian)
- [5] Eliasberg P. E. *Vvedenie v teoriyu poleta iskusstvennogo sputnika Zemli* [Introduction in the theory of flight of the artificial companion of the earth]. Moscow, Librikom, 2011, 544 p. (In Russian)
- [6] Chebotarev V. E. On-orbit eclipse periods for artificial lunar satellite // *The Research of the Science City*, 2014, no. 1, pp. 12–18. (In Russian)
- [7] Kazmerchuk P. V., Martynov M. B., Moskatiniyev I. V., Sisoiev V. K., Yudin A. D. *Kosmicheski apparat «Luna-25» - osnova novih issledovaniy Luni* [Spacecraft «Luna-25» – the basis of new research of the Moon] // *Vestnik NPO im. S. A. Lavochkina*, 2016, no. 4 (34), pp. 9–19. (In Russian)
- [8] Kosenko V. E., Popov V. V., Zvonar V. D., Chebotarev V. E. *Analiz preemstvennosti razvitiya KA unformatsionnogo obespecheniya* [Analysis of the continuity of the development of information support spacecraft] / *Aktual'nye voprosy proektirovaniya AKA dlya fundamental'nyh i prikladnyh nauchnyh issledovanij* [Actual problems of AKA design for fundamental and applied scientific research]. Khimki, FSUE «S. A. Lavochkina», 2017, issue 2, pp. 132–140. (In Russian)
- [9] Chebotarev V. E., Vorontsova E. O., Sidorova E. A. *Modelirovanie tenevix zon na okololunniy orbitah i osobennosti rasssheta parametrov sistem elektropitaniya i termoregulirovaniya okololunnogo kosmicheskogo apparata* [Modeling of shadow zones in circumlunar orbits and peculiarities of calculating the parameters of power supply systems and thermal control of a circumlunar spacecraft] // *Reshetnev readings : materials of the XXIV International scientific-practical conference*. Krasnoyarsk, 2020, vol. 1, pp. 49–51. (In Russian)
- [10] Fortescue P, Swinerd G, Stark J. *Spacecraft Systems Engineering*. 2015, 724 p.
- [11] Tumanov A. V., Zelentsov V. V., Shcheglov G. A. *Osnovi komponovki bortovogo oborudovaniya kosmicheskikh apparatov* [Foundations of layout of on-Board equipment of spacecraft]. Moscow, Bauman MSTU, 2010. 136 p. (In Russian)

Сведения об авторах

Чеботарев Виктор Евдокимович – доктор технических наук, профессор, ведущий инженер-конструктор АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». Окончил Харьковский государственный университет в 1963 году. Область научных интересов: проектирование космических систем и космических аппаратов.

Воронцова Евгения Олеговна – инженер АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва», аспирант Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. Окончила Сибирский федеральный университет в 2009 году. Область научных интересов: космическая техника.

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

Подписанный лицензионный договор и акт, а также оригиналы акта экспертного заключения и заключения 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: 150–180 слов.
- ◄ Ключевые слова (4–7 слов или словосочетаний).
- ◄ Пристатейный список литературы, оформленный в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008. Рекомендуется использование не менее 15 (минимум 10) источников не старше 15 лет.
- ◄ Следом необходимо привести заголовок, ФИО автора(ов), организацию, аннотацию, ключевые слова и список литературы 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).

Требования к представляемому тексту, иллюстрациям и приставному списку литературы:

- ◀ Объем статьи, включая иллюстрации и список литературы, 10–20 страниц формата А4 (210 × 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.
- ◀ При использовании в тексте сокращенных 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. 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.). Список литературы следует оформлять в порядке ссылок на него 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. Список литературы нумеруется арабскими цифрами без использования автоматической нумерации.

МЕЖДУНАРОДНАЯ IEEE-СИБИРСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО УПРАВЛЕНИЮ И СВЯЗИ (SIBCON–2021)

Пятнадцатая IEEE-Сибирская конференция, посвящённая достижениям в области разработки и создания систем управления, связи и робототехники, проводится с 13 по 15 мая 2021 года в г. Казани, Россия. Конференция SIBCON регулярно организуется Томской группой и студенческим отделением IEEE, компанией National Instruments для того чтобы поддерживать междисциплинарные дискуссии, взаимодействие и сотрудничество через участие в деятельности профессиональных сообществ Института IEEE. Конференция является международной платформой для представления и обсуждения новых фундаментальных и прикладных исследований в области разработки электронных систем связи, управления и робототехники. Конференция предоставляет учёным возможность презентации своих докладов и установления научных и образовательных контактов с коллегами из России и других стран.

Основные направления конференции

1. Фундаментальные проблемы теории управления и связи.
2. Робототехника и автоматизация.
3. Компьютерные технологии управления, сенсоры и системы.

Информационная поддержка конференции

- Журнал «Автоматика и программная инженерия»
www.jurnal.nips.ru
- Отраслевой научно-технический журнал «Космические аппараты и технологии» www.journal-niss.ru
- Журнал «Труды СПИИРАН» proceedings.spiiras.nw.ru

Ключевые даты:

- 4 декабря 2020** – последний срок приёма докладов
30 января 2021 – уведомление о включении докладов в программу
15 апреля 2021 – регистрация участников

Подробная информация о регистрации, инструкции для подготовки статей и научная программа доступны на сайте конференции sibcon2021.universityevents.ru

Архив конференции доступен на сайте ieee.tpu.ru/sibcon/sibcon.html



*Малые спутники –
большие возможности!*



В Красноярском крае в 2010 году создано и по настоящее время успешно развивается ООО «Научно-производственный центр «Малые космические аппараты», ориентированное на выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области космических технологий.

В настоящее время ООО «НПЦ «МКА» это:

- проектирование и производство малых космических аппаратов и их составных частей (бортовых приборов и аппаратуры);
- разработка спутниковых платформ для создания малых космических аппаратов;
- создание земных средств контроля и управления для космических аппаратов.

ООО «НПЦ «МКА»
Россия, 662971, Красноярский край,
г. Железногорск, ул. Школьная 33, пом. 25.
Тел./факс: +7 (3919) 74-60-06. E-mail: info@npc-mka.ru
<http://www.npc-mka.ru>