

КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ И

ТЕХНОЛОГИИ SPACECRAFTS &
TECHNOLOGIES



Разгонный блок «Фрегат»

Производитель: АО «НПО Лавочкина»

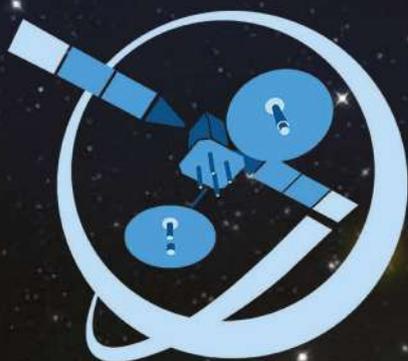


Технологическая платформа

НИСС

Национальная Информационная
Спутниковая Система

**№2 (36)
2021**



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 5

№ 2 (36)

2021

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)

Редакционная коллегия
Головёнкин Евгений Николаевич
д-р техн. наук, профессор (Железногорск)

Двирный Валерий Васильевич
д-р техн. наук, профессор (Железногорск)

Ковель Анатолий Архипович
д-р техн. наук, профессор (Железногорск)

Лопатин Александр Витальевич
д-р техн. наук, профессор (Красноярск)

Охоткин Кирилл Германович
д-р физ.-мат. наук, доцент (Железногорск)

Пономарев Сергей Васильевич
д-р техн. наук (Томск)

Матвеев Станислав Алексеевич
канд. техн. наук (Санкт-Петербург)

Непомнящий Олег Владимирович
канд. техн. наук, доцент (Красноярск)

Симунин Михаил Максимович
канд. техн. наук, доцент (Красноярск)

Смотров Андрей Васильевич
канд. техн. наук (Жуковский)

Сухотин Виталий Владимирович
канд. техн. наук, доцент (Красноярск)

Хартов Станислав Викторович
канд. техн. наук (Красноярск)

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, www.readera.org

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 13943
Дата выхода в свет 25.06.2021

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 (Russian Federation)

Deputy Chief Editor

Khalimanovich Vladimir I.

PhD in Physics and Mathematics, Professor (Russian Federation)

Executive Secretary

Khnykin Anton V.

PhD in Engineering (Russian Federation)

Editorial Board

Annin Boris D.

Academician of RAS, Doctor of Physics and Mathematics,
Professor (Russian Federation)

Popov Garry A.

Academician of RAS, Doctor of Engineering, Professor
(Russian Federation)

Shabanov Vasily Ph.

Academician of RAS, Doctor of Physics and Mathematics,
Professor (Russian Federation)

Vasiliev Valery V.

Academician of RAS, Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

Makhutov Nikolay A.

Corresponding Member of RAS, Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

Petrukovich Anatoly A.

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

Shaidurov Vladimir V.

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

Belyaev Boris A.

Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

Chebotarev Victor E.

Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

Fateev Yuri L.

Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

Garin Eugene N.

Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

Khartov Victor V.

Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

Kosenko Victor E.

Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

Krasilshchikov Michael N.

Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

Medvedtskiy Alexander L.

Doctor of Physics and Mathematics (Russian Federation)

Ovchinnikov Sergey G.

Doctor of Physics and Mathematics, Professor (Russian Federation)

Panko Sergey P.

Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

Pchelyakov Oleg P.

Doctor of Physics and Mathematics, Professor (Russian Federation)

Cherniavsky Alexander G.

(Russian Federation)

Editorial Council

Golovenkin Eugene N.

Doctor of Engineering, Professor, Professor (Russian Federation)

Dvirny Valery V.

Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

Kovel Anatoly A.

Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

Lopatin Alexander V.

Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

Okhotkin Kirill G.

Doctor of Physics and Mathematics, Associate Professor (Russian Federation)

Ponomarev Sergey V.

Doctor of Physics and Mathematics (Russian Federation)

Khartov Stanislav V.

PhD in Engineering (Russian Federation)

Matveev Stanislav A.

PhD in Engineering (Russian Federation)

Nepomnyashy Oleg V.

PhD in Engineering, Associate Professor (Russian Federation)

Simunin Mikhail M.

PhD in Engineering, Associate Professor (Russian Federation)

Smotrov Andrey V.

PhD in Engineering (Russian Federation)

Sukhotin Vitaly V.

PhD in Engineering, Associate Professor (Russian Federation)

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, www.readera.org

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

- З. А. Юдина, М. И. Синиченко, А. П. Ладыгин,
Ф. К. Синьковский, Д. Б. Усманов**
ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВИБРАЦИИ
В АГРЕГАТЕ ЭЛЕКТРОНАСОСНОМ
КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА
И СПОСОБЫ ЕЕ СНИЖЕНИЯ

И. П. Попов

- ЭЛЕМЕНТЫ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА
ПРИ ГРАВИТАЦИОННОМ МАНЕВРЕ
КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

- З. А. Юдина, М. И. Синиченко, А. П. Ладыгин,
Ф. К. Синьковский, А. Д. Кузнецов**
ВЕНТИЛЬ ДЛЯ ДВУХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ
ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ

КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

А. И. Горностаев

- ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ИНТЕРФЕЙСНЫХ
МОДУЛЕЙ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУР
В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРАХ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

- Р. Б. Ковалев, В. В. Корниенко, В. Н. Ратушняк**
ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ СИНХРОНИЗАЦИИ
РАЗНЕСЕННЫХ НАЗЕМНЫХ ПУНКТОВ
СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

**НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ
В КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ**

- В. В. Блинов, В. М. Владимиров, С. Н. Кулинич,
А. И. Никифоров, Д. Н. Придачин, Д. О. Пчеляков,
О. П. Пчеляков, Л. В. Соколов, Д. В. Яроцкий**
ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР
В ОТКРЫТОМ КОСМОСЕ

ROCKET AND SPACE EQUIPMENT

- Z. A. Yudina, M. I. Sinichenko, A. P. Ladigin,
F. K. Sin'kovskiy, D. B. Usmanov**
THE VIBRATION ORIGIN IN THE ELECTRIC
PUMP OF THE SPACECRAFT AND METHODS
TO REDUCE THEM

I. P. Popov

- ELEMENTS OF BALLISTIC CALCULATION
FOR SPACECRAFT GRAVITY ASSIST

- Z. A. Yudina, M. I. Sinichenko, A. P. Ladigin,
F. K. Sin'kovskiy, A. D. Kuznetsov**
VALVE FOR TWO-PHASE FLUID LOOP

SPACE INSTRUMENT ENGINEERING

A. I. Gornostaev

- FEATURES OF ENSURING NOISE IMMUNITY
OF INTERFACE MODULES FOR TEMPERATURE
CONTROL IN MEASURING INSTRUMENTS
OF SPACECRAFT

- R. B. Kovalev, V. V. Kornienko, V. N. Ratushnik**
ESTIMATION OF THE SYNCHRONIZATION
ERROR FOR SPACED-APART GROUND POINTS
OF SATELLITE COMMUNICATION

**NEW MATERIALS AND TECHNOLOGIES
IN SPACE EQUIPMENT**

- V. V. Blinov, V. M. Vladimirov, S. N. Kulinich,
A. I. Nikiforov, D. N. Pridachin, D. O. Pchelyakov,
O. P. Pchelyakov, L. V. Sokolov, D. V. Yarockiy**
EQUIPMENT FOR GROWING SEMICONDUCTOR
HETEROSTRUCTURES IN OUTER SPACE

ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВИБРАЦИИ В АГРЕГАТЕ ЭЛЕКТРОНАСОСНОМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА И СПОСОБЫ ЕЕ СНИЖЕНИЯ

**З. А. Юдина[✉], М. И. Синиченко, А. П. Ладыгин,
Ф. К. Синьковский, Д. Б. Усманов**

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

Разработка высокоресурсных электронасосных агрегатов, ориентированных для эксплуатации в составе ракетно-космической, авиационной и транспортной техники, является важной задачей. Данные агрегаты являются активными устройствами преобразования энергии, обеспечивают функциональность системы терморегулирования. Его отказ приводит к непоправимым последствиям: неисправностям сопрягаемого оборудования, отказам системы в целом, авариям со значительным экономическим ущербом. Вибрация для электронасосного агрегата является наиболее неблагоприятным фактором, сказывающимся на его надежности. Данное обстоятельство обуславливает актуальность, целесообразность и важность поставленных задач исследования виброактивности электронасосного агрегата – причин появления вибраций и способами борьбы с ними. Рассмотрены основные источники вибраций в электронасосном агрегате космического аппарата, а именно: механические, гидродинамические и электротехнические. Рассмотрены рекомендации зарубежных и отечественных авторов по мерам борьбы с каждым источником. Было проведено исследование технического уровня существующих разработок, результатов, основных технических решений и тенденций развития технических решений для решения проблемы по снижению виброактивности электронасосных агрегатов. На основании данного обзора были сформулированы основные направления дальнейших исследований виброактивности, которые способны привести к ее снижению в существующих конструкциях электронасосных агрегатов.

Ключевые слова: электронасосный агрегат, космический аппарат, виброактивность.

Введение

Безотказная работа электронасосного агрегата (ЭНА) космического аппарата (КА) в течение всего срока активного существования является одним из ключевых показателей его надежной работы. Выход из эксплуатации ЭНА на орбите является точкой единичного отказа КА. Ввиду особенностей своей работы, ЭНА являются элементами, подшипниковые узлы которых испытывают нагрузку на всем протяжении срока службы. Многочисленными исследованиями было установлено, что повышенная вибрация для ЭНА является наиболее неблагоприятным фактором, сказывающимся на его надежности. В данной статье будут рассматриваться основные источники

вибраций в малорасходном центробежном насосе, тенденции исследований по их уменьшению. Также будут проанализированы отечественные и зарубежные экспериментальные и теоретические работы в части поиска решения по уменьшению нагрузок в ЭНА, возникающих от вибраций [1]. Работа проводилась в инициативном порядке, с целью совершенствования существующего оборудования и вне рамок государственных контрактов.

Особенности малорасходных насосов вызывают трудности при их проектировании, отработке и эксплуатации. Исследование процессов в них осложняется проблемами измерения малых расходов рабочей жидкости, малых крутящих моментов, малых осевых и радиальных усилий, величин давления, скорости в каналах малых размеров, которые не позволяют вводить датчики в поток [2].

[✉] u-z-a@yandex.ru

Статистические данные показывают, что большое число поломок и аварий в машиностроении происходит по причине повышенной вибрации [3]. Согласно исследованиям насосных станций магистральных нефтепроводов, на долю отказов центробежных насосов по причине повышенной вибрации приходится 38–45 % от всех отказов [4]. Помимо этого при проектировании высокоресурсного ЭНА предъявляются требования к ограничению вибрационной нагрузки в диапазоне от 5 до 1000 Гц в целях обеспечения точности работы прецизионного оборудования КА. Исходя из этого, величина вибрации в насосе должна оставаться в определенных рамках во время всего срока активного существования (САС) [5]. Задачу улучшения вибрационных характеристик ЭНА необходимо рассматривать комплексно. Следовательно, необходимо исследовать динамику системы, включающей: двигатель, вибровозбудитель, рабочий орган и внешнюю среду их связи, промежуточные элементы [5]. Виброактивность машин определяется тремя факторами: конструкцией, технологией изготовления и условиями эксплуатации [3]. Источники вибраций в насосе разделяются на механические, гидродинамические и электротехнические [4]. Также, некоторые авторы отдельно выделяют технологический источник вибраций. В данной работе особое внимание будет уделено гидродинамическому и механическому источникам вибраций. Электротехнический источник вибраций будет рассмотрен с точки зрения объекта вибромониторинга, но доработка данной части насоса рассмотрена не будет.

1. Гидродинамический источник вибрации

Наименее изучена и прогнозируема вибрация гидродинамического происхождения [4; 6]. Существует мнение, что данный источник вибрации является главным для вибромониторинга состояния насоса [7]. Уровни вибрации насосов, вызываемые гидродинамическими источниками, пропорциональны квадрату окружной скорости вращения ротора [3]. Причиной возникновения является взаимодействие рабочей жидкости с механической частью, воспринимающее данное воздействие и передающее его на подшипниковые узлы, корпус и фундаменты агрегатов. Следствием такого воздействия является разрушение подшипников, гидроабразивный износ, а в особо тяжелых случаях, разрушение рабочих колес и отводов. Такая вибрация является результатом несимметричного неравномерного потока рабочей жидкости, которая, взаимодействуя с входными кромками лопатки рабочего колеса, кромками лопастей направляющего аппарата, а также спи-

рального сборника, порождает различные вихри. Результатом вихреобразования являются пульсации давления. Колебательные процессы также возникают от циркуляционного движения жидкости и вихреобразования [6]. В свою очередь, вихри происходят в условиях недогруженности насоса [7]. Согласно [4; 8; 9], работа насоса на повышенном или пониженном режиме ведет к различным гидравлическим эффектам. При пониженной подаче возникают эффекты кавитации и пульсации давления. При повышенной подаче возникает турбулентность. В исследовании [10] приводятся результаты эксперимента, согласно которому при работе насоса в повышенном режиме ($1,22Q$, где Q – подача насоса) были обнаружены повышения среднеквадратического значения (СКЗ) виброскорости (рис. 1). Согласно результатам работы [4], повышенная вибрация у насосов девяти нефтеперекачивающих станций регистрировалась только при работе насосов с пониженной подачей и на лопаточной частоте. Вследствие отклонения режимов работы насосов от оптимальных подач, как в сторону снижения, так и сторону повышения, возникают нестационарные процессы. При этом нестационарные процессы на входе колес сопровождаются пульсациями давления с лопастной частотой, кратной количеству лопастей рабочего колеса насоса, а на выходе колес – с лопаточной частотой, кратной произведению лопастной частоты и количеству лопаток отвода [4].

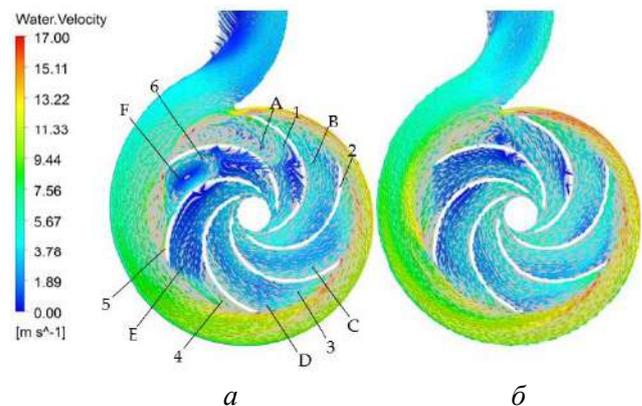


Рис. 1. Распределение скоростей в насосе в зависимости от условий работы (результаты моделирования): а – $0,2Q$; б – $0,4Q$. Режимы частичной нагрузки насоса приводят к обратным потокам рабочей жидкости (зоны А, Е, F), вызывая пульсации давления; зоны В, С, D – зоны с однородным распределением скоростей; 1–6 – лопатки рабочего колеса

Нестационарные гидродинамические процессы сопровождаются вихреобразованием в потоке рабочей среды, неоднородностью потока, кавитацией [3; 11]. Такие явления и являются основным возбудителем колебаний в ЭНА [4; 12]. Нестационарные процессы в насосе сопровожда-

ются потерями энергии, и они коррелируют с величиной возникающей вибрации [11]. Еще одним следствием нестационарных процессов в ЭНА являются пульсации давления. Они появляются вследствие того, что количество лопастей рабочего колеса конечно, что порождает турбулентный поток, трение и образование завихрений на пограничных слоях рабочей жидкости [12].

В исследовании [14] с помощью моделирования методом конечных объемов было установлено, что амплитуда пульсаций давления максимальна между вращающейся и не вращающейся частью насоса. При номинальном расходе на направляющих лопастях скорость рассеивания потока относительно однородная и пульсации давления наименьшие.

Кавитация считается наиболее распространенной проблемой, связанной с движением потока рабочей жидкости в насосе. Наиболее распространены отклики широкополосной вибрации по причине кавитации и турбулентности, поэтому очень важным становится уменьшение вибрации данного происхождения для разработки надежного насосного оборудования [7]. Хорошо известно, что даже в условиях отсутствия кавитации в центробежном насосе существуют неустойчивости потока при изменении расхода. В частности, неустойчивость внутреннего потока усиливается, когда насосы работают в этих условиях, которые сильно отклоняются от проектной скорости потока. Неустойчивый поток в насосе не только приводит к неустойчивым динамическим характеристикам, которые включают пульсации давления и силу гидравлического возбуждения, но также вызывает вибрацию конструкций и шум. Колебания на лопаточной частоте и ее гармониках являются результатом гидравлических возмущений, которые следуют за задней кромкой вращающихся лопастей, а также вызваны гидродинамическим взаимодействием лопастей со спиральной камерой насоса. Они считаются важными источниками вибрации и гидравлического шума. Между тем, вибрация, имеющая специфические характеристики, которые, по-видимому, можно наблюдать в частотной области, также может быть вызвана взаимодействием ротора и статора в центробежных насосах. Виброактивность может усиливаться когда частота вибрации, вызванная нестационарным потоком, близка к частоте гармоник, создаваемых внешним возбуждением. В исследовании [10] с помощью проведенных виброизмерений при различных расходах центробежного насоса было установлено, что неустойчивость потока возрастала при изменении расхода, особенно в режиме частичной нагрузки. Также при различных расходах наблюдалась турбулентность различной интенсивности, относительная однородность и симметричность потока была определена при увеличении расхо-

да от $0,8Q$ до $1,2Q$. Подобные выводы приведены в работе [9]. Было установлено, что насос, работающий в режиме частичной нагрузки, испытывает повышенную вибрацию. Методом трехмерного численного моделирования было выявлено, что когда поток меньше, чем $0,7Q$, у модельного насоса проявляется обратный поток от рабочего колеса. Интенсивность обратного потока увеличивается с уменьшением расхода, следовательно, образуются сильные завихрения и вихревые полосы, возникают пульсации давления с низкой частотой на входе насоса, а также в системе трубопроводов.

Был проведен численный анализ для насоса с перепадом давления 18 м и частотой вращения 2950 об/мин при различных расходах. Анализ показал, что радиальная сила и виброперемещения рабочего колеса ЭНА самые низкие при рабочем расходе и возрастают при повышенном или пониженном режиме [11].

В вопросах изучения повышенной вибрации гидродинамического происхождения немаловажным является и фактор наличия самой рабочей жидкости в ЭНА. В исследовании с помощью численных методов [15] сравнивали виброактивность рабочего колеса с воздухом и жидкостью. Было обнаружено, что при работе в жидкости на лопаточной частоте проявляет себя нелинейный отклик более высокого порядка, чем в газе. Жидкость действительно меняет динамическое поведение системы, увеличивая амплитуду колебаний. Жидкость, как и ожидалось, приводит к неустойчивости колебаний в осевом направлении и сдвигает резонансы в сторону более высоких частот. Можно предположить, что собственные частоты также изменяются в зависимости от скорости вращения вала [4].

По результатам исследования [17] в рабочем колесе закрытого типа преобладают интенсивные вторичные течения и обширные зоны отрыва вдоль тыльной стороны лопатки. Такие эффекты могут не только быть источниками вибраций, но и приводить к повреждениям механических частей насоса [5; 7].

Еще одним следствием повышенной вибрации гидродинамического происхождения является то, что насос вынужден эксплуатироваться с недогрузкой по производительности, что может привести к недостаточности необходимого теплоотвода в систему терморегулирования КА.

Рассмотрим подробнее какие конструктивные параметры оказывают наибольшее влияние на интенсивность вибрации в насосе: радиальный зазор между рабочим колесом и языком спирали; диаметр входного отверстия рабочего колеса; количество лопастей рабочего колеса; количество входов жидкости в рабочее колесо; частота рабочего колеса; угол наклона лопасти на входе рабочего колеса; угол наклона лопасти на выходе

рабочего колеса; диаметр входного отверстия рабочего колеса; ширина рабочего колеса на выходе. Рассмотрим выводы, применимые к каждому параметру.

Было установлено на центробежном насосе малого размера с помощью метода разделения акустических источников, что по мере увеличения зазора между спиральным сборником и рабочим колесом насоса шум, возникающий от потока жидкости, снижался [3; 13].

Было выявлено, что увеличение угла атаки основного потока смещает поток жидкости в сторону прототока соседних лопаток, что приводит к усилению воздействия на переднюю кромку лопасти и усилению интенсивности турбулентности в этих областях. Кроме того, на распределение турбулентной кинетической энергии выходящего потока также влияет изменение направления потока, вызывающее увеличение локальных потерь энергии и снижение КПД насоса. Следовательно, очевидно, что угол атаки передней кромки лопастей в крыльчатке имеет большое влияние на неустойчивость потока центробежного насоса, даже если он находится в условиях отсутствия кавитации. Ранее считалось, если угол атаки передней кромки лопастей слишком велик, это приводит к уменьшению производительности насоса и пульсаций давления на входе и выходе насоса. Однако было представлено, что относительно большой угол атаки передних кромок лопастей благоприятен для производительности центробежного насоса в условиях перегрузки [10].

В работе [16] приведен вывод о том, что увеличение угла наклона лопасти рабочего колеса на выходе и увеличение ширины рабочего колеса на выходе лопастей приводит к уменьшению интенсивности вторичных течений, что также положительно сказывается на энергетических характеристиках насоса.

Согласно выводам, приведенным в [4], для снижения вибрации в центробежном насосе необходимо уменьшить угол наклона лопасти на входе рабочего колеса, уменьшить диаметр входного отверстия рабочего колеса (а также ротора и насоса в целом), уменьшить частоту вращения рабочего колеса [6; 8; 10; 13], увеличить количество лопастей рабочего колеса.

При вихреобразовании, вызванном пониженной нагрузкой на ЭНА, на происходящие процессы в лопастях и межлопастных каналах оказывает большое влияние угол атаки лопастей на входе. Большой угол атаки ведет к разделению потока на всасывающих поверхностях лопастей, такой процесс приводит к появлению обратного потока на входе и вихреобразованию [17].

В работе [13] приведены следующие выводы: численным методом было установлено, что в центробежном насосе при частоте вращения ро-

тора 2900 об/мин при прочих равных конструктивных параметрах напор увеличивался по мере роста угла лопасти на выходе (от 18 до 39°). Пульсации давления на первой лопаточной частоте увеличивались, а на второй лопаточной частоте уменьшались по мере роста угла лопатки на выходе. При увеличении угла лопасти на выходе на каждые 3° сила пульсаций в объеме жидкости между рабочим колесом и спиральным отводом увеличилась приблизительно на 12 %. При возрастании угла лопасти на выходе от 18 до 39° уровень излучения звукового давления возрос на 8,6 дБ.

В исследовании, представленном в [18], приведены результаты экспериментов, согласно которым скругление выходной кромки рабочего колеса с внутренней стороны основного диска значительно выравнивает эпюру скорости, при этом увеличивая напор для ступеней габарита 2А на 4 %, а КПД на 5,7 %.

Движение рабочей жидкости по спиральному отводу также создает определенные эффекты, например, гидродинамическое разбалансирование рабочего колеса. Это явление появляется в результате движения жидкости по спиральному отводу относительно центра, который находится вне оси вращения рабочего колеса [19]. Такое движение порождает неуравновешенную силу гидродинамического происхождения, следствием действия которой является ускоренный износ подшипниковых опор, появление у вала остаточной деформации изгиба, придающей дополнительную несбалансированность ротору. Для предотвращения такого эффекта используют двухспиральный отвод центробежного насоса (рис. 2). В данном случае гидродинамические эффекты, возникающие в спиральном отводе, в значительной степени компенсируются.

Применение лопаточного отвода значительно уменьшает значение несбалансированности ротора в радиальном направлении из-за сил, возникающих при вращении в спиральном отводе. При недостаточной сбалансированности лопаточного отвода необходимо увеличить число каналов самого отвода [19]. Применение лопаточного отвода также положительно влияет на уменьшение энергетических потерь жидкости на выходе из колеса.

Подведем предварительный итог по мерам борьбы с повышенной виброактивностью гидродинамического происхождения. Исходя из изученных материалов, меры борьбы с гидродинамическим источником вибрации вытекают из факторов как вызывающих эту вибрацию, так и определяющих ее прохождение [6]. Наиболее эффективными мерами являются:

1) Определение рабочей точки насоса. Выбор максимально эффективной рабочей точки насоса [8; 12].

2) Изменение конструктивных параметров.

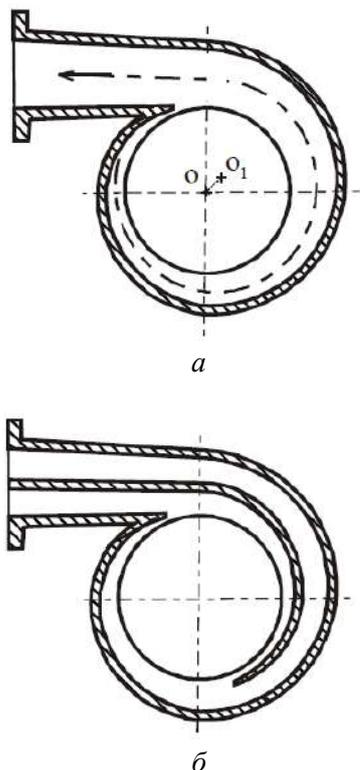


Рис. 2. Двухспиральный отвод центробежного насоса: *a* – гидродинамическое разбалансирование рабочего колеса; *б* – двухспиральный отвод. *O* – ось вращения рабочего колеса; *O*₁ – некоторый центр, вне оси вращения

3) Использование безлопаточного конфузорного аппарата [3].

4) Обеспечение однородности и стационарности поля скоростей на входе в рабочее колесо [3].

5) Применение графитовых колец как щелевых уплотнений, запрессованных в корпусные детали. Они воспринимают радиальные нагрузки при износе подшипников и работают как подшипники скольжения [20].

6) Улучшение кавитационных качеств [20] (лопасти двойной кривизны, уменьшение диффузорности входного кольцевого канала, увеличение радиусов поворота каналов).

7) Уменьшение вихреобразования (установка управляющих колец на уплотнения, увеличение зазора между выходными кромками колеса и направляющим аппаратом, нечетное количество лопастей, обеспечение плавных переходов и больших радиусов по всей длине проточной части, а также установка приемного и напорного патрубков) [3].

8) Использование виброизоляции и вибропоглощения [3].

9) Увеличение жесткости конструкции за счет увеличения толщины стенок [3].

10) Отстройка собственных частот колебаний элементов насоса от частот возмущающих сил [3].

11) Замена подшипников качения подшипниками скольжения [3].

12) Изготовление деталей из материалов, обладающих высокими демпфирующими свойствами (пластмассы).

2. Механический источник вибраций

Сходы механического происхождения часто случаются по причинам, вызванным их взаимодействием с гидравлической частью. К примеру, от воздействия потока рабочей жидкости на рабочее колесо насоса происходит его повреждение, оно начинает передаваться на вал электродвигателя, что вызывает его колебания и поломку [7]. Также колебания ротора возникают вследствие неуравновешенности центробежных сил, частота этих колебаний равна частоте вращения ротора. Однако, дисбаланс ротора – главная причина его выхода из строя и одна из главных причин возникновения вибрации механического происхождения в насосе и возникновения вынужденных колебаний [22; 23]. Вынужденные колебания происходят с частотой, равной частоте вращения, за счет неточности соединения вала и рабочего колеса [21].

В работе [24] раскрывается проблема дисбаланса ротора и его несоосности, как одной из основных причин повышенной вибрации в насосе. В данном случае предлагалось вести вибромониторинг состояния машины на этапе сборки и заменять или дорабатывать детали для достижения необходимой величины вибрации [8].

Разбалансировка во время работы вследствие износа и влияния местных повышений температур также является частой причиной колебаний механического происхождения [3].

Различные дефекты подшипников тоже оказывают влияние на формирование неблагоприятных условий работы насоса [5]. Существует множество причин выхода из строя подшипниковых опор – это перегрев, повышенные радиальные и осевые нагрузки, приходящие от потока рабочей жидкости, неправильная эксплуатация насосного агрегата, изгибные деформации вала электродвигателя [7].

Рассмотрим наиболее распространенные меры борьбы с вибрацией механического происхождения в ЭНА:

1. Балансировка. Поскольку одним из основных источников вибраций в насосе является дисбаланс подвижных частей, то многие работы были посвящены мерам борьбы с ним. В многоступенчатых нефтяных насосах в качестве меры борьбы с виброактивностью была предложена методика снижения уровня вибрации от неуравновешенных вращающихся деталей насоса, базирующаяся на

принципе определения последовательности расположения рабочих колес с измеренными эксцентриситетами на оси вала [25; 26].

Согласно работе [27], снижение величины дисбаланса в нефтяном консольном насосе в 14,5 раз приводит к снижению СКЗ виброскорости в 1,46 раз. Увеличение отклонения расцентровки дисбаланса в 50 раз приводит к снижению СКЗ виброскорости в 1,25 раза.

2. Обеспечение гарантированного осевого прижатия шариков к поверхностям желобов внутреннего и наружного колец шарикоподшипников в процессе работы [20].

3. Уменьшение консоли вала, увеличение его жесткости для обеспечения наименьших изгибных колебаний вала и радиальных перемещений рабочего колеса [20].

4. Выбор подшипниковых опор. Выбор подшипниковых опор – основополагающая задача при проектировании ЭНА, поскольку в зависимости от принципа их работы будет меняться его конструкция. Их долговечность и надежность – первоочередная задача повышения ресурса всего ЭНА.

Рассмотрим наиболее распространенные виды подшипников, применяемых в высокоресурсных ЭНА:

1. Подшипники скольжения. Они предпочтительны в больших агрегатах. Существуют различные конструкции подшипников скольжения [29–31], где применяется виброизоляционный композитный материал, а также полиимид, окруженный оболочкой из эластомера. Считается, что такие конструкции подшипников имеют хорошие виброизоляционные свойства и износостойкость, однако недостаточно эффективно снижают виброактивность вследствие тонкого слоя эластомера или не позволяют выполнять более сложные формы подшипников скольжения (поверхности с канавками, формы с вырезами по диаметру).

В работе [32] приведен вывод, что подшипник скольжения снижает виброактивность за счет уменьшения прогиба ротора вследствие исключения задеваний в уплотнениях рабочих колес.

Опоры скольжения имеют и ряд недостатков, там присутствуют эффекты автоколебаний, а наличие зазоров в подшипниковых опорах вызывает динамические биения и усиливает виброактивность. Проблема автоколебаний решается применением формы подшипников с некруглой формой расточки (трехцентровые, со смещенными вкладышами) [21].

2. Гидродинамические подшипники. Для таких подшипников типичная вибродиагностика – это измерение относительного перемещения вала относительно корпуса (мкм) [7].

Трудность в использовании таких подшипников состоит в сложности определения параметров их работы (зазор, условия контакта поверх-

ностей), для этого требуется численное решение уравнений Рейнольдса. Для данной геометрии подшипника необходимы три параметра (или, скорее, набор параметров), чтобы охарактеризовать влияние на поведение машины, а именно жесткость, демпфирование и грузоподъемность. Параметры жесткости и демпфирования являются матрицами, которые зависят от скорости вращения вала [23].

Ресурс гидродинамических подшипников намного больше ресурса подшипников качения, в частности, при очень высоких скоростях. Сложностью использования этих подшипников является высокая скорость вращения вала, которая позволяет обеспечить гарантированный смазочный слой. Нарушение смазочного слоя даже на короткий срок приводит к значительным неисправностям и выходу из строя ЭНА.

3. Гидростатические подшипники. В таком типе подшипника ротор поддерживается масляной пленкой, но поле давления в масле создается внешним насосом, а не вращением самого вала, и это имеет как преимущества, так и недостатки. Преимущества заключаются в том, что нагрузка может восприниматься на низкой скорости, а рабочие параметры могут изменяться извне с помощью внешнего насоса [23].

4. Подшипники качения. Шарикоподшипник – наиболее распространенный вид подшипника в малых насосах благодаря высоким скоростям работы и низкому трению [33]. Шарикоподшипник даже при отсутствии дефектов на нем, является источником вибрации. При возникновении дефектов вибрация возрастает и имеет определенную картину в зависимости от возникшего дефекта (рис. 3) [34]. Рассмотрим простые шарикоподшипники качения и их влияние на вибрацию. Такие подшипники необходимо оценивать параметрами вибрации на специальных стендах. Обычно уровень виброактивности задается на этапе конструирования и обеспечивается технологией изготовления и сборки [3]. Также, вибромониторинг тел качения – важная составляющая вибродиагностики всего агрегата [35; 36].

Износ таких подшипников приводит к увеличению радиального биения ротора, росту радиальных усилий и далее процесс разрушения подшипников развивается лавинообразно [21]. Необходимо оценивать критическую скорость подшипника для недопущения резонанса с валом. Для снижения критической скорости необходимо увеличить зазор в подшипнике.

Низкочастотные колебания в шарикоподшипниках (200–300 Гц) – вызваны неуравновешенностью вращающихся масс, несоосностью приводов, нарушением геометрии подшипников, периодическими силами, создаваемыми рабочим процессом. Данные колебания определяют дина-

мическую прочность агрегатов и несут с собой подавляющую долю колебательной энергии [3].

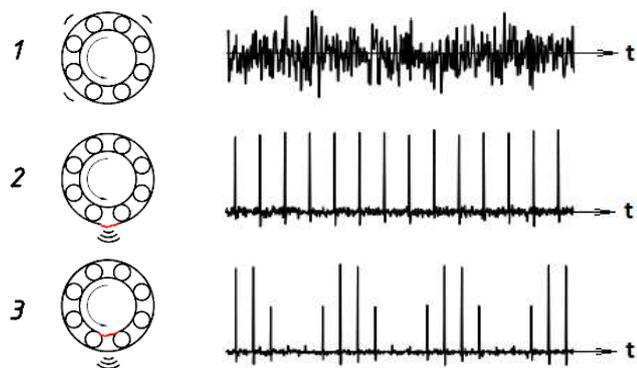


Рис. 3. Характер вибраций подшипников качения в зависимости от их дефектов: 1 – подшипник без дефекта; 2 – дефект наружного кольца; 3 – дефект внутреннего кольца

Решением проблемы повышенной вибрации в данном типе подшипников является применение особых подшипников качения с бесшпоночной и беззазорной посадкой на гладкий вал.

5. Магнитные подшипники. Магнитные подшипники бывают двух типов: пассивные и активные. В обоих случаях основным преимуществом является то, что с помощью магнитного поля для левитации и определения местоположения ротора исключается любой контакт с ротором, а потери на трение чрезвычайно низки [23].

3. Электротехнический источник вибрации

Рассмотрим источник повышенной вибрации со стороны электродвигателя. Источниками такой вибрации являются: магнитный шум асинхронного двигателя; магнитная проводимость воздушного зазора; радиальные силы, создаваемые магнитными полями; тангенциальные силы, вызываемые радиальными силами; эксцентриситет воздушного зазора; повреждение; перегрев; обрыв; межвитковые замыкания фазных обмоток; межфазные замыкания; распайка паяк в обмотках и бандажах; перегрев контактов; изменение зазора между статором и ротором; дисбаланс (биение) ротора; перегрузки по моменту; перегрев и размагничивание постоянных магнитов ротора; неисправности силовой электроники управляющих блоков [37; 38].

Многие из этих проблем решаются точностью изготовления электродвигателей. Эксцентриситет воздушного зазора является серьезным источником вибраций, такая проблема появляется при несоосности статора и ротора. Обмотка ротора должна быть симметричной для избегания изгибных колебаний.

Одним из способов повышения надежности электромеханических устройств космических аппаратов является проведение диагностики их технического состояния при наземных испытаниях и выявление возможных дефектов. В качестве диагностических параметров электромеханической системы рекомендуется измерять: виброскорости и виброускорения механической системы; общий ток потребления; напряжение питания; фазные напряжения; фазные токи, подаваемые на обмотки двигателя; сигналы датчика положения ротора; внутренние напряжения блока управления в отдельных точках (выходы операционных усилителей, шины питания и т. п.); частоту вращения ротора двигателя; момент, развиваемый двигателем; температуру в контрольных точках [39].

4. Вибрации, вызванные технологией изготовления ЭНА

Выводы в работе [4] указывают на то, что на данный момент не существует исследований, раскрывающих причины технологической вибрации центробежных насосов, все исследования в этом направлении несут преимущественно эмпирический характер и не имеют достаточной обобщающей теоретической базы. Технологические методы борьбы с вибрацией [3]:

1. Повышение точности обработки и сборки. В изобретении [29] упоминается, что расточка посадочных отверстий корпусов насоса за один установ снижает виброактивность механического происхождения.

2. Поэлементная балансировка роторов и балансировка их в сборе.

3. Остаточная неуравновешенность ротора должна строго выверяться и контролироваться.

4. Контроль качества подшипников качения.

5. Повышение точности обработки посадочных мест под подшипники в соответствии с точностью обработки колец подшипников.

6. Исключение натягов при посадке подшипников с целью исключения их деформации.

7. Исключение деформаций от температуры и давления, так как это может привести к разбалансировке.

8. Обеспечение простоты контроля вибрации.

5. Исследование тенденций развития ЭНА

Было произведено исследование уровня техники и тенденций развития насосов в части увеличения ресурса и показателей надежности и реализация этих решений в условиях космоса. Патентное исследование проводилось для электронасосных агрегатов, электрогидравлических нагнетателей, ориентированных на работу с химически агрес-

сивными жидкостями для эксплуатации в составе ракетно-космической, авиационной и транспортной техники. Были проанализированы тенденции развития данной темы в отношении Российской Федерации, США, стран ЕС, Японии, КНР и т. д.

По результатам патентных исследований было выявлено, что в подавляющем большинстве реализуются центробежные насосы, часто многоступенчатые, с целью повышения КПД [40–43]. Встречаются образцы со сложной организацией потока в целях омывания подвижных узлов [42; 44], что повышает общий ресурс изделия. По виду исполнения самого электронасосного агрегата можно выделить нерезервированные [38; 43; 44] и резервированные [40; 47–51]. Большого внимания заслуживают дублированные варианты, поскольку такие конструкции более надежные, однако сложны в изготовлении, несмотря на ряд усовершенствований в целях повышения технологичности [49–51]. При этом в подобных конструкциях часто встречается двусторонний обратный клапан различной конфигурации [49; 51–53], что усложняет изделие и может снижать надежность. Встречается множество усовершенствований, которые, в конечном итоге, снижают гидравлические потери, часто с применением диффузора [46; 54], некоторые конструкции имеют различную организацию входных и выходных патрубков [55] или рабочее колесо с разной длиной лопастей [56]. По способу исполнения насоса можно встретить варианты как с посадкой рабочего колеса на вал двигателя [40; 44; 47; 48; 50; 51; 53; 56; 57], так и на отдельный вал насоса. Отдельный вал имеет собственные подвижные узлы [58–62], при этом вал насоса имеет полу конструкцию для дополнительного течения жидкости и массообмена внутри изделия. Преимуществом варианта с отдельным исполнением насоса представляется легкая замена электродвигателя в конструкции [63]. Особого внимания заслуживают изделия с магнитной муфтой [60; 64] при передаче вращения от электродвигателя насосу, что обеспечивает высокую надежность и снижает влияние пульсаций от рабочего колеса на опорные узлы электродвигателя.

Во всех патентных документах встречается техническое решение с оболочкой, разделяющей полость ротора и полость статора. Ротор в таких конструкциях оmyвается рабочей жидкостью, что обеспечивает эффективное охлаждение, а статор надежно защищен от контакта с жидкостью. В некоторых вариантах защита статора выполняется покрытием [65; 66]. Много зарубежных образцов выполняется с подшипниками скольжения [67–69]. Отдельного внимания заслуживают системы управления электронасосными агрегатами. Некоторые [70], в целях повышения надежности, обеспечивают функционирование при обрывах сигнальных или силовых цепей, другие [71] вы-

полняют подстройку частоты вращения электродвигателя насоса по показаниям температуры для получения требуемой потребителем подачи.

По итогу анализа можно сделать следующие выводы:

1. Все патентозаявители реализуют разделение полостей статора и ротора, ротор оmyвается перекачиваемой жидкостью в целях охлаждения и смазывания опорных узлов.

2. Подавляющее большинство насосов – центробежные, встречаются среди технических образцов осевые насосы. Это обусловлено отсутствием трущихся поверхностей насосной части.

3. Отдельное внимание уделяется геометрии колеса центробежного насоса, способу изготовления колеса закрытого типа, способу подбора. Это направлено на повышение КПД насоса.

4. Отечественные образцы чаще всего выполняются со встраиваемым корпусным электродвигателем. В качестве подвижных элементов вала используют подшипники качения. Зарубежные образцы наиболее часто выполняются на гидродинамических подшипниках скольжения. В случае с зарубежными образцами данное решение обеспечивает высокие показатели ресурса и надежности, что заслуживает особого внимания.

5. Существуют отдельные решения в вопросах контроля работы электронасоса, в частности по температуре, напору и расходу.

6. Основная тенденция развития электронасосных агрегатов – использование центробежных насосов с гидродинамическими подшипниками скольжения. Насос в своем составе имеет бескорпусной электродвигатель, ротор которого оmyвается рабочей жидкостью.

Заключение

В каждом разделе данного обзора были сделаны выводы, касающиеся мер борьбы с повышенной вибрацией в ЭНА в зависимости от источника ее возникновения. Стоит отметить, что в АО «ИСС» имеется значительный опыт в вопросах вибромониторинга состояния ЭНА, поскольку непрерывный контроль величины вибрации в насосах является важнейшим элементом его надежной работы [5; 7]. Вибромониторинг позволяет не только обнаружить текущий процесс разрушения, но и предугадать тенденцию к возникновению негативных явлений, которые приведут к ненадежной работе насоса. Однако, для повышения показателей надежности вновь разрабатываемых конструкций ЭНА для платформ мощностью от 25 кВт, необходимо искать пути решения, позволяющие обеспечить непрерывную работу на весь период САС. Для отработки таких решений наиболее приемлемым вариантом является их введение в существующую конструкцию ЭНА и сравнение

вновь получаемой вибродиагностической информации с имеющейся.

На основании данного обзора были сформулированы возможные тенденции для развития конструктивных решений, обеспечивающих центробежному насосу работу с пониженными уровнями вибрации при их эксплуатации на КА. Особое внимание заслуживают следующие пути понижения виброактивности:

1. Подбор сочетания конструктивных параметров рабочего колеса насоса, наиболее под-

ходящих для обеспечения необходимых расходно-напорных и вибрационных характеристик, учитывая рекомендации из приведенных исследований.

2. Применение гидродинамических подшипников в электродвигателях вместо шарикоподшипников.

Таким образом, планируется доработка штатного насоса согласно проведенному анализу решений для исследования тенденций снижения его виброактивности.

Список литературы

- [1] Кузнецова З. А., Синиченко М. И., Кузнецов А. Д., Клешина И. А., Синьковский Ф. К. Исследование влияния конструктивных параметров рабочего колеса на величину осевой нагрузки центробежного электронасосного агрегата // Сибирский журнал науки и технологий. 2020. Т. 21. № 3. С. 389–399. doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-3-389-399
- [2] Краев М. В., Лукин В. А., Овсянников Б. В. Малорасходные насосы авиационных и космических систем. М. : Машиностроение, 1985. 128 с.
- [3] Григорьева Н. В. Вибрация энергетических машин : справ. пособие. Л. : Машиностроение, 1974. 464 с.
- [4] Перовощиков С. И. Разработка научных основ управления вибрацией гидродинамического происхождения в центробежных насосах магистральных нефтепроводов : дисс. д-ра техн. наук: 05.02.13. Тюмень : ТюмГНГУ, 2004. 48 с.
- [5] Быховский И. И. Основы теории вибрационной техники. М. : Машиностроение, 1968. 362 с.
- [6] Джафари П. Снижение вибрации гидродинамического происхождения насосно-силовых агрегатов // Научный вестник МГТУ ГА. 2011. № 173. С. 137–140.
- [7] Hammond, Osama H. I. Compound fault diagnosis of centrifugal pumps using vibration analysis techniques : doctoral thesis. University of Huddersfield, 2018. 181 p.
- [8] Luo Y., Yuan Sh., Yuan J., Lu J. Research on Characteristic of the vibration spectral entropy for centrifugal pump // Hindawi Publishing Corporation Advances in Mechanical Engineering. 2014. 9 p.
- [9] Si Q., Yuan Sh., Yuan J., Liang Y. Investigation on Flow-induced noise due to backflow in low specific speed centrifugal pumps // Hindawi Publishing Corporation Advances in Mechanical Engineering. 2013. 11 p.
- [10] Lu J., Liu X., Zeng Y., Zhu B., Hu B., Yuan Sh., Hua H. Detection of the flow state for a centrifugal pump based on vibration // MDPI. 2013. 18 p.
- [11] Cui B., Li J., Zhang Ch., Zhang Y. Analysis of radial force and vibration energy in a centrifugal pump // Hindawi Mathematical Problems in Engineering. 2020. 12 p.
- [12] Basic principles for the design of centrifugal pump installations. Sterling SIHI, 2003. 389 с.
- [13] Yang A., Lang D., Li G., Chen E., Dai R. Numerical research about influence of blade outlet angle on flow-induced noise and vibration for centrifugal pump // Hindawi Publishing Corporation Advances in Mechanical Engineering. 2014. 11 p.
- [14] Zhang X., Wang P., Ruan X., Xu Zh., Fu X. Analysis of pressure pulsation induced by rotor-stator interaction in nuclear reactor coolant pump // Hindawi Shock and Vibration. 2017. 18 p.
- [15] M.M.E. van Osch. Rotor dynamics of a centrifugal pump. Technische Universiteit Eindhoven, 2006. 54 p.
- [16] Бобков А. В. Повышение эффективности малоразмерных центробежных насосов авиакосмических энерго-силовых установок и систем терморегулирования : дисс. д-ра техн. наук: 05.07.05. М. : ГОУВПО «КНАГТУ», 2004. 399 с.
- [17] Wu Y., Li S., Liu S., Dou H.-S., Qian Z. Vibration of Hydraulic Machinery. Springer, 2013. 500 p.
- [18] Кузьмин А. В. Исследование характеристик лопастного насоса для добычи нефти при изменении геометрии проточной части его ступени : дисс. канд. техн. наук: 05.02.13. М. : ФГБОУ ВО «ЗГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина», 2018. 257 с.
- [19] Перовощиков С. И. Конструкция центробежных насосов (общие сведения) : учеб. пособие. Тюмень : ТюмГНГУ, 2013. 228 с.
- [20] Иванов Я. Н., Ивченко Л. Ф., Стебловцев А. А., Шнякин В. Н. Разработка конструкции и исследование электронасосного агрегата с ресурсом работы более 35000 часов // Авиационно-космическая техника и технология. 2003. № 5. С. 114–117.
- [21] Челомей В. Н. Вибрации в технике : справочник в 6-ти т. М : Машиностроение, 1980. Т. 3. 544 с.

- [22] Куцубина Н. В., Санников А. А. Теория виброзащиты и акустической динамики машин : учеб. пособие. Екатеринбург : УГЛТУ, 2014. 167 с.
- [23] Краев М. В., Лукин В. А., Овсянников Б. В. Малорасходные насосы авиационных и космических систем. М. : Машиностроение, 1985. 128 с.
- [24] Nurulhusna binti Mohd Mohtar. Vibration analysis of centrifugal pump : Dissertation of the Bachelor of Engineering. Universiti Teknologi Petronas. 2013. 37 p.
- [25] Волоховская О. А. Снижение виброактивности центробежных насосов путем изменения последовательности расположения рабочих колес на оси вала // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2010. № 4. С. 69–78.
- [26] Волоховская О. А. Об одном подходе к снижению уровня вибраций погружных центробежных насосов для нефтедобычи // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. № 4 (2). 2011. С. 82–84.
- [27] Валюхов С. Г., Ярославцев С. В., Патрахин Р. И. Экспериментальное исследование влияния параметров упругой муфты и дисбаланса консольных насосов на уровень виброактивности // Труды X Междунар. науч.-техн. конф. «СИНТ'19». 2019. С. 134–142.
- [28] Ряховский О. А., Обозный Ю. С., Кушнарев В. И., Гуськов А. М. Магистральный нефтяной центробежный насос с ротором на подшипниках качения и способ улучшения характеристик насоса. Пат. № 2485352 Российская Федерация, 2013. Бюл. № 17.
- [29] Бургетт Д., Хартман Ю., Хельдманн Й. Виброизоляционный композитный материал подшипника скольжения, вкладыш подшипника скольжения и узел подшипника скольжения. Пат. № 2461746 Российская Федерация, 2012. Бюл. № 26.
- [30] Dry journal bearing. Patent US 3881791. 1975.
- [31] Merot Ph., Bozet J. L., Poysat P. Polymeric bearing with elastomer. Patent 2003/0012467 USA, 2003.
- [32] Богун В. С., Войтов С. Н. Многоступенчатый центробежный насос. Пат. № 2361117 Российская Федерация, 2009. Бюл. № 19.
- [33] Bloch H. P., Budris A. R. Pump user's handbook life extension. Third edition. Fairmont Press, 2010. 506 p.
- [34] Harris T. A., Kotzalas M. N. Essential Concepts of Bearing Technology. Fifth edition. CRC Press, 2007. 375 p.
- [35] Ovacikli A. K. Condition Monitoring of Ball Bearings Using Vibration Analysis. Lulba University of Technology, 2010. 54 p.
- [36] Jauregui Correa J. C., Lozano Guzman A. Mechanical vibrations and condition monitoring. Elsevier, 2020. 202 p.
- [37] Шубов И. Г. Шум и вибрация электрических машин. Л. : Энергоатомиздат, 1986. 208 с.
- [38] Коротков Е. Б., Слободзян Н. С., Ширококов О. В., Киселев А. А., Надежин М. И. Наземная система комплексной диагностики электромеханических устройств космических аппаратов // Радиопромышленность. 2019. № 4. С. 54–62. doi: 10.21778/2413-9599-2019-29-4-54-62
- [39] Матвеев С. А., Жуков Ю. А., Коротков Е. Б., Ширококов О. В., Надежин М. И., Ладыгин А. П. Обзор методов диагностики электронасосных агрегатов спутниковых платформ // Радиопромышленность. 2020. Т. 30. № 3. С. 86–98. doi: 10.21778/2413-9599-2020-30-3-86-98
- [40] Логанов А. А., Овечкин Г. И., Бородин Л. М., Синиченко М. И., Шилкин О. В. Электронасосный агрегат. Пат. № 2574782 Российская Федерация, 2016. Бюл. № 4.
- [41] Белоусов Н. И. Многоступенчатый электронасосный агрегат. Пат. № 2162547 Российская Федерация, 2001. Бюл. № 3.
- [42] Логанов А. А., Овечкин Г. И., Бородин Л. М., Синиченко М. И. Смирнов В. В., Воловиков В. Г. Двухступенчатый электронасосный агрегат. Пат. № 2618777 Российская Федерация, 2008. Бюл. № 14.
- [43] Heat exchange module and serial pump thereof. Patent US 10198046. 2016.
- [44] Electro motor driven pump. Patent US 10465679. 2014.
- [45] Electro motor, pump device using electric motor, and stator. Patent US 2167341. 2013.
- [46] Белоусов Н. И. Электронасосный агрегат. Пат. № 2208183 Российская Федерация, 2003. Бюл. № 19.
- [47] Белоусов Н. И. Дублированный электронасосный агрегат. Пат. № 2160389 Российская Федерация, 2000. Бюл. № 34.
- [48] Белоусов Н. И. Резервированный электронасосный агрегат. Пат. № 2160390 Российская Федерация, 2000. Бюл. № 34.
- [49] Белоусов Н. И. Электронасосный агрегат. Пат. № 2329401 Российская Федерация, 2008. Бюл. № 20.
- [50] Белоусов Н. И. Электронасосный агрегат. Пат. № 2357104 Российская Федерация, 2009. Бюл. № 15.
- [51] Белоусов Н. И. Дублированный электронасосный агрегат. Пат. № 2511788 Российская Федерация, 2014. Бюл. № 10.
- [52] Белоусов Н. И. Дублированный электронасосный агрегат. Пат. № 2329402 Российская Федерация, 2008. Бюл. № 20.
- [53] Белоусов Н. И. Дублированный электронасосный агрегат. Пат. № 2599402 Российская Федерация, 2016. Бюл. № 28.
- [54] Белоусов Н. И. Электронасосный агрегат. Пат. № 2162549 Российская Федерация, 2001. Бюл. № 3.

- [55] Белоусов Н. И. Электронасосный агрегат. Пат. № 2162548 Российская Федерация, 2001. Бюл. № 3.
[56] Electrically driven pump. Patent US 10415582. 2016.
[57] Electric-motor-driven liquid pump. Patent US 10337513. 2016.
[58] Белоусов Н. И. Электронасосный агрегат. Пат. № 2680635 Российская Федерация, 2019. Бюл. № 6.
[59] Белоусов Н. И. Электронасосный агрегат. Пат. № 2642877 Российская Федерация, 2018. Бюл. № 4.
[60] Двирный В. В., Тестоедов Н. А., Бартенев В. А., Туркенич Р. П., Роскин С. М. Электронасосный агрегат. Пат. № 2396464 Российская Федерация, 2010. Бюл. № 22.
[61] Белоусов Н. И. Электронасосный агрегат. Пат. № 2357103 Российская Федерация, 2009. Бюл. № 15.
[62] Белоусов Н. И. Электронасосный агрегат. Пат. № 2358161 Российская Федерация, 2009. Бюл. № 16.
[63] Electric fuel pump and pump mechanism for a fuel pump. Patent CA 2321608. 2000.
[64] Яперов И. Ф. Электронасосный агрегат. Пат. № 45481 Российская Федерация, 2005. Бюл. № 13.
[65] Electric fuel pump. Patent US 20170363052. 2017.
[66] Electric fuel pump. Patent EU 3258096. 2017.
[67] Electric pump unit. Patent US 10400767. 2015.
[68] Electric coolant pump. Patent US 10415590. 2016.
[69] Automotive electric liquid pump. Patent US 10458414. 2014.
[70] Electric fuel pump uninterrupted power supply. Patent US 10054075. 2017.
[71] System and method for cold temperature control of an electric oil pump. Patent US 10330096. 2014.

THE VIBRATION ORIGIN IN THE ELECTRIC PUMP OF THE SPACECRAFT AND METHODS TO REDUCE THEM

**Z. A. Yudina, M. I. Sinichenko, A. P. Ladigin,
F. K. Sin'kovskiy, D. B. Usmanov**

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

The important problem for rocket-space, aviation and transport equipment fields is designing high-resource electric pumps. Electric pumps are active energy conversion devices to provide the thermal control system operation. Electric pumps failure leads to fault of the interfaced equipment, system failures and significant economic damage accidents. The most unfavorable factor for electric pump reliability is vibration. That the reason of relevance, practicability and importance to research the electric pumps vibration activity, the reasons for the appearance of vibrations and ways to control them. The paper provides the main sources of electric pump of the spacecraft vibrations as mechanical, hydrodynamic and electrical. This paper presents the recommendations of foreign and domestic authors to control each vibration source. To solve the problem of reducing the electric pump vibration activity the research of the technical level of existing developments, results, main technical solutions and technical solutions trends was produced. The main directions of further electric pump vibration activity researches leading to decreasing of vibration activity were defined on this paper.

Keywords: electric pump, spacecraft, vibration.

References

- [1] Kuznetsova Z. A., Sinichenko M. I., Kuznetsov A. D., Kleshnina I. A., Sin'kovskiy F. K. Study of impeller design parameters effect on the axial thrust of a centrifugal electric pump assembly // Siberian Journal of Science and Technology, 2020, vol. 21, no. 3, pp. 389–399. doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-3-389-399
[2] Kraev M. V., Lukin V. A., Ovsyannikov B. V. *Maloraskhodnye nasosy aviatsionnykh i kosmicheskikh sistem* [Low-flow pumps of aviation and space systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985, 128 p.

- [3] Grigor'eva N. V. *Vibratsiya energeticheskikh mashin. Spravochnoe posobie* [Vibration of power machines. Reference manual]. St. Petersburg, Mashinostroenie Publ., 1974, 464 p. (In Russian)
- [4] Perevoshchikov S. I. *Razrabotka nauchnykh osnov upravleniya vibratsiei gidrodinamicheskogo proiskhozhdeniya v tsentrobezhnykh nasosakh magistral'nykh nefteprovodov* [Development of scientific foundations for vibration control of hydrodynamic origin in centrifugal pumps of main oil pipelines] : Doct. Diss. Tyumen', TyumGNGU Publ., 2004, 347 p. (In Russian)
- [5] Bykhovskii I. I. *Osnovy teorii vibratsionnoi tekhniki* [Foundations of the theory of vibration technology]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968, 362 p.
- [6] Dzhafari P. *Snizhenie vibratsii gidrodinamicheskogo proiskhozhdeniya nasosno-silovykh agregatov* [Reduction of vibration of hydrodynamic origin of pumping and power units]. Nauchnyi vestnik MGTU GA, 2011, no. 173, pp. 137–140. (In Russian)
- [7] Hammond, Osama H. I. Compound fault diagnosis of centrifugal pumps using vibration analysis techniques : doctoral thesis. University of Huddersfield, 2018, 181 p.
- [8] Luo Y., Yuan Sh., Yuan J., Lu J. Research on Characteristic of the vibration spectral entropy for centrifugal pump // Hindawi Publishing Corporation Advances in Mechanical Engineering, 2014, 9 p.
- [9] Si Q., Yuan Sh., Yuan J., Liang Y. Investigation on Flow-induced noise due to backflow in low specific speed centrifugal pumps // Hindawi Publishing Corporation Advances in Mechanical Engineering, 2013, 11 p.
- [10] Lu J., Liu X., Zeng Y., Zhu B., Hu B., Yuan Sh., Hua H. Detection of the flow state for a centrifugal pump based on vibration // MDPI, 2013, 18 p.
- [11] Cui B., Li J., Zhang Ch., Zhang Y. Analysis of radial force and vibration energy in a centrifugal pump // Hindawi Mathematical Problems in Engineering, 2020, 12 p.
- [12] Basic principles for the design of centrifugal pump installations. Sterling SIHI, 2003, 389 p.
- [13] Yang A., Lang D., Li G., Chen E., Dai R. Numerical research about influence of blade outlet angle on flow-induced noise and vibration for centrifugal pump // Hindawi Publishing Corporation Advances in Mechanical Engineering, 2014, 11 p.
- [14] Zhang X., Wang P., Ruan X., Xu Zh., Fu X. Analysis of pressure pulsation induced by rotor-stator interaction in nuclear reactor coolant pump // Hindawi Shock and Vibration, 2017, 18 p.
- [15] M.M.E. van Osch. Rotor dynamics of a centrifugal pump. Technische Universiteit Eindhoven, 2006, 54 p.
- [16] Bobkov A. V. *Povyshenie effektivnosti malorazmernykh tsentrobezhnykh nasosov aviakosmicheskikh energosilovykh ustanovok i sistem termoregulirovaniya* [Improving the efficiency of small-sized centrifugal pumps of aerospace power plants and thermal control systems] : Doct. Diss. Moscow, 2004, 399 p. (In Russian)
- [17] Wu Y., Li S., Liu S., Dou H.-S., Qian Z. Vibration of Hydraulic Machinery, Springer, 2013, 500 p.
- [18] Kuz'min A. V. *Issledovanie kharakteristik lopastnogo nasosa dlya dobychi nefi pri izmenenii geometrii protochnoi chasti ego stupeni* [Study of the characteristics of a vane pump for oil production when changing the geometry of the flow path of its stage] : Cand. Diss. Moscow, 2018, 257 p. (In Russian)
- [19] Perevoshchikov S. I. *Konstruktsiya tsentrobezhnykh nasosov (obshchie svedeniya)* [The design of centrifugal pumps (general information)]. Tyumen', TyumGNGU Publ., 2013, 228 p. (In Russian)
- [20] Ivanov Ya. N., Ivchenko L. F., Steblovtsev A. A., Shnyakin V. N. *Razrabotka konstruktsii i issledovanie elektronasosnogo agregata s resursom raboty bolee 35000 chasov* [Design development and research of an electric pump unit with a service life of more than 35000 hours] // Aerospace technic and technology, 2003, no. 5, pp. 114–117. (In Russian)
- [21] Chelomei V. N. *Vibratsii v tekhnike* [Vibration in technology: a Handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980, vol. 3, 544 p. (In Russian)
- [22] Kutsubina N. V., Sannikov A. A. *Teoriya vibrozashchity i akusticheskoi dinamiki mashin: uchebnoe posobie* [Theory of vibration protection and acoustic dynamics of machines: a tutorial]. Ekaterinburg, UGLTU Publ., 2014, 167 p. (In Russian)
- [23] Kraev M. V., Lukin V. A. Ovsyannikov B. V. *Maloraskhodnye nasosy aviatsionnykh i kosmicheskikh system* [Low-flow pumps for aircraft and space systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985, 128 p. (In Russian)
- [24] Nurulhusna binti Mohd Mohtar. Vibration analysis of centrifugal pump : Dissertation of the Bachelor of Engineering, Universiti Teknologi Petronas, 2013, 37 p.
- [25] Volokhovskaya O. A. *Snizhenie vibroaktivnosti centrobeznykh nasosov putem izmeneniya posledovatel'nosti raspolozheniya rabochih koles na osi vala* [Reducing the vibration activity of centrifugal pumps by changing the sequence of the impellers on the shaft axis]. Engineering and automation problems, 2010, no. 4, pp. 10–22. (In Russian)
- [26] Volokhovskaya O. A. *Ob odnom podhode k snizheniyu urovnya vibratsij pogruzhnykh centrobeznykh nasosov dlya nefte dobychi* [On one approach to reducing the vibration level of submersible centrifugal pumps for oil production]. Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod, 2011, no. 4 (2), pp. 82–84. (In Russian)
- [27] Valyukhov S. G., Yaroslavtsev S. V., Patrakhin R. I. *Eksperimental'noe issledovanie vliyaniya parametrov uprugoy mufy i disbalansa konsol'nykh nasosov na uroven' vibroaktivnosti* [Experimental study of the influence of elastic

- coupling parameters and unbalance of cantilever pumps on the level of vibration activity] / Proceedings of the X International Scientific and Technical Conference «SPT'19», 2019, pp. 134–142. (In Russian)
- [28] Ryakhovsky O. A., Obozny Yu. S., Kushnarev V. I., Guskov A. M. *Magistral'nyi nefityanoi tsentrobezhnyi nasos s rotorom na podshipnikakh kacheniya i sposob uluchsheniya kharakteristik nasosa* [Mainline oil centrifugal pump with a rotor on rolling bearings and a method for improving pump performance]. Patent RU 2485352, 2013, bulletin no. 17.
- [29] Burgett D., Khartman Yu., Khel'dmann I. *Vibroizolyatsionnyi kompozitnyi material podshipnika skol'zheniya, vkladyshe podshipnika skol'zheniya i uzel podshipnika skol'zheniya* [Vibration-insulating composite material for plain bearing, sleeve for sleeve bearing and sleeve bearing assembly]. Patent RU 2461746, 2012, bulletin no. 26.
- [30] Dry journal bearing. Patent US 3881791, 1975.
- [31] Merot Ph., Bozet J. L., Poysat P. Polymeric bearing with elastomer. Patent 2003/0012467 USA, 2003.
- [32] Bogun V. S., Voitov S. N. *Mnogostupenchatyi tsentrobezhnyi nasos* [Multistage centrifugal pump]. Patent RU 2361117, 2009, bulletin no. 19.
- [33] Bloch H. P., Budris A. R. Pump user's handbook life extension. Third edition. Fairmont Press Publ., 2010, 506 p.
- [34] Harris T. A., Kotzalas M. N. Essential Concepts of Bearing Technology. Fifth edition. CRC Press Publ., 2007, 375 p.
- [35] Ovacikli A. K. Condition Monitoring of Ball Bearings Using Vibration Analysis. Lulba University of Technology Publ., 2010, 54 p.
- [36] Jauregui Correa J. C., Lozano Guzman A. Mechanical vibrations and condition monitoring. Elsevier Publ., 2020, 202 p.
- [37] Shubov I. G. *Shum i vibratsiya elektricheskikh mashin* [Noise and vibration of electrical machines]. St. Petersburg, Energoatomizdat Publ., 1986, 208 p. (In Russian)
- [38] Korotkov E. B., Slobodzyan N. S., Shirobokov O. V., Kiselev A. A., Nadezhin M. I. Complex ground diagnostic system for spacecraft electromechanical devices // Radio industry, 2019, no. 4, pp. 54–62. doi: 10.21778/2413-9599-2019-29-4-54-62
- [39] Matveev S. A., Zhukov Y. A., Korotkov E. B., Shirobokov O. V., Nadezhin M. I., Ladygin A. P. Overview of diagnostic methods for electric pump units of satellite platforms // Radio industry, 2020, vol. 30, no. 3, pp. 86–98. doi: 10.21778/2413-9599-2019-30-3-86-98
- [40] Loganov A. A., Ovechkin G. I., Borodin L. M., Sinichenko M. I., Shilkin O. V. *Elektronasosnyi agregat* [Electric pumping unit]. Patent RU 2574782, 2016, bulletin no. 4.
- [41] Belousov N. I. *Mnogostupenchatyi elektronasosnyi agregat* [Multistage electric pump unit]. Patent RU 2162547, 2001, bulletin no. 3.
- [42] Loganov A. A., Ovechkin G. I., Borodin L. M., Sinichenko M. I., Smirnov V. V., Volovikov V. G. *Dvuhstupenchatyj elektronasosnyj agregat* [Two-stage electric pump unit]. Patent RU 2618777, 2008, bulletin no. 14.
- [43] Heat exchange module and serial pump thereof. Patent US 10198046, 2016.
- [44] Electro motor driven pump. Patent US 10465679, 2014.
- [45] Electro motor, pump device using electric motor, and stator. Patent US 2167341, 2013.
- [46] Belousov N. I. *Elektronasosnyi agregat* [Electric pump unit]. Patent RU 2208183, 2003, bulletin no. 19.
- [47] Belousov N. I. *Dublirovannyi elektronasosnyi agregat* [The duplicated electric pumping unit]. Patent RU 2160389, 2000, bulletin no. 34.
- [48] Belousov N. I. *Rezervirovannyi elektronasosnyi agregat* [Redundant electric pump unit]. Patent RU 2160390, 2000, bulletin no. 34.
- [49] Belousov N. I. *Elektronasosnyi agregat* [Electric pump unit]. Patent RU 2329401, 2008, bulletin no. 20.
- [50] Belousov N. I. *Dublirovannyi elektronasosnyi agregat* [The duplicated electric pumping unit]. Patent RU 2357104, 2009, bulletin no. 15.
- [51] Belousov N. I. *Dublirovannyi elektronasosnyi agregat* [The duplicated electric pumping unit]. Patent RU 2511788, 2014, bulletin no. 10.
- [52] Belousov N. I. *Dublirovannyi elektronasosnyi agregat* [The duplicated electric pumping unit]. Patent RU 2329402, 2008, bulletin no. 20.
- [53] Belousov N. I. *Dublirovannyi elektronasosnyi agregat* [The duplicated electric pumping unit]. Patent RU 2599402, 2016, bulletin no. 28.
- [54] Belousov N. I. *Elektronasosnyi agregat* [Electric pump unit]. Patent RU 2162549, 2001, bulletin no. 3.
- [55] Belousov N. I. *Elektronasosnyi agregat* [Electric pump unit]. Patent RU 2162548, 2001, bulletin no. 3.
- [56] Electrically driven pump. Patent US 10415582, 2016.
- [57] Electric-motor-driven liquid pump. Patent US 10337513, 2016.
- [58] Belousov N. I. *Elektronasosnyi agregat* [Electric pump unit]. Patent RU 2680635, 2019, bulletin no. 6.
- [59] Belousov N. I. *Elektronasosnyi agregat* [Electric pump unit]. Patent RU 2642877, 2018, bulletin no. 4.
- [60] Dvirny V. V., Testodov N. A., Bartenev V. A., Turkenich R. P., Roskin S. M. *Elektronasosnyi agregat* [Electric pumping unit]. Patent RU 2396464, 2010, bulletin no. 22.

- [61] Belousov N. I. *Elektronasosnyi agregat* [Electric pump unit]. Patent RU 2357103, 2009, bulletin no. 15.
- [62] Belousov N. I. *Elektronasosnyi agregat* [Electric pump unit]. Patent RU 2358161, 2009, bulletin no. 16.
- [63] Electric fuel pump and pump mechanism for a fuel pump. Patent CA 2321608, 2000.
- [64] Yaperov I. F. *Elektronasosnyi agregat* [Electric pumping unit]. Patent RU 45481, 2005, bulletin no. 13.
- [65] Electric fuel pump. Patent US 20170363052, 2017.
- [66] Electric fuel pump. Patent EU 3258096, 2017.
- [67] Electric pump unit. Patent US 10400767, 2015.
- [68] Electric coolant pump. Patent US 10415590, 2016.
- [69] Automotive electric liquid pump. Patent US 10458414, 2014.
- [70] Electric fuel pump uninterrupted power supply. Patent US 10054075, 2017.
- [71] System and method for cold temperature control of an electric oil pump. Patent US 10330096, 2014.

Сведения об авторах

Ладыгин Андрей Петрович – начальник отдела АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва в 2004 году. Область научных интересов: разработка и исследование работы агрегатов системы терморегулирования космического аппарата.

Синиченко Михаил Иванович – заместитель начальника отдела АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». Окончил Томский государственный политехнический университет в 1977 году. Область научных интересов: разработка и исследование работы агрегатов системы терморегулирования космического аппарата.

Синьковский Федор Константинович – кандидат технических наук, заместитель директора – главный конструктор отраслевого центра крупногабаритных трансформируемых механических систем АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». Окончил Сибирскую аэрокосмическую академию в 1997 году. Область научных интересов: композиционные материалы, крупногабаритные трансформируемые механические системы, конструкция космического аппарата.

Усманов Давид Бисенович – главный специалист отраслевого центра крупногабаритных трансформируемых механических систем по математическому обеспечению АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва».

Юдина Зоя Алексеевна – инженер-конструктор 2 категории АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». Окончила Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва в 2017 году. Область научных интересов: разработка и исследование работы агрегатов системы терморегулирования космического аппарата.

ЭЛЕМЕНТЫ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ПРИ ГРАВИТАЦИОННОМ МАНЕВРЕ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

И. П. Попов

*Курганский государственный университет,
г. Курган, Российская Федерация*

Цель исследования – аналитическое описание участка баллистической траектории, соответствующего нормальному падению космического аппарата на поверхность безатмосферной планеты. При этом движение нормально падающего тела характеризуется возрастающим ускорением свободного падения. Задача о скорости, времени и ускорении нормального падения тела на поверхность планеты при отсутствии атмосферы сводится к решению дифференциального уравнения второго порядка, которое решается стандартным методом. Особенностью решения является формальное использование табличного интеграла на промежуточном этапе. Оказалось, однако, что его формула недостоверна, а именно, производная правой части не равна подынтегральному выражению. Из этого следует, что возможные существующие решения этой задачи, основанные на использовании указанного табличного интеграла, являются некорректными. В статье представлена корректировка этого табличного интеграла, что является попутным результатом исследования. В работе получено временное уравнение движения нормально падающего на поверхность планеты тела при отсутствии атмосферы, а также временные уравнения его скорости и ускорения. Полученные результаты могут быть полезны при расчетах пассивного гравитационного маневра при межпланетных полетах и расчетах отвесного падения небольших небесных тел и отработанных элементов конструкций космических аппаратов.

Ключевые слова: баллистическая траектория, пассивный гравитационный маневр, космический аппарат, межпланетный полет, небесное тело.

Введение

Если перемещение тела при падении пренебрежимо мало по сравнению с расстоянием до центра тяготения, то ускорение свободного падения является практически неизменным. При этом задача установления параметров падения не представляет трудности. Далее этот случай не рассматривается.

1. Задача о скорости и времени падения тела

Падающее в вакууме тело имеет ускорение

$$a = \frac{d^2 r}{dt^2} = -G \frac{M}{r^2}, \quad (1)$$

где G – гравитационная постоянная, M – масса планеты, r – мгновенное расстояние между телом

и центром планеты. Исходное расстояние равно R . Знак « \rightarrow » обусловлен противоположными направлениями векторов \mathbf{a} и \mathbf{r} . Масса тела пренебрежимо мала по сравнению с M .

Дифференциальное уравнение (1) решается следующим образом.

$$\begin{aligned} \frac{dr}{dt} &= v(r), \quad \frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{dv}{dt}, \\ \frac{dv}{dt} &= \frac{dv}{dr} \frac{dr}{dt} = \frac{dv}{dr} v = \frac{dv}{dr} v, \\ \frac{d^2 r}{dt^2} &= \frac{dv}{dr} v, \quad \frac{dv}{dr} v = -G \frac{M}{r^2}, \end{aligned}$$

$$v dv = -GM \frac{dr}{r^2}, \quad \int_0^v v dv = -GM \int_R^r \frac{dr}{r^2},$$

$$\frac{v^2}{2} = GM \frac{1}{r} \Big|_R^r,$$

$$\frac{v^2}{2} = GM \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right), \quad (2)$$

$$v = -\sqrt{2GM} \sqrt{\frac{1}{r} - \frac{1}{R}}. \quad (3)$$

Знак « \leftarrow » обусловлен той же причиной, что и выше.

$$\frac{dr}{dt} = -\sqrt{2GM} \sqrt{\frac{1}{r} - \frac{1}{R}},$$

$$\sqrt{\frac{r}{R-r}} dr = -\sqrt{\frac{2GM}{R}} dt. \quad (4)$$

2. Табличный интеграл

Для решения дифференциального уравнения (4) формально подходит табличный интеграл [1–3]:

$$\int \sqrt{\frac{a+x}{b-x}} dx = -\sqrt{(a+x)(b-x)} - (a+b) \arcsin \sqrt{\frac{b-x}{a+b}} + C. \quad (5)$$

Оказалось, однако, что эта формула недостоверна, а именно, производная правой части не равна подынтегральному выражению. Действительно,

$$\begin{aligned} \frac{df}{dx} &= -\frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{(a+x)(b-x)}} (-a+b-2x) + \\ &+ (a+b) \frac{1}{\sqrt{1-\frac{b-x}{a+b}}} \frac{1}{2} \sqrt{\frac{a+b}{b-x}} = \\ &= \frac{a-b+2x}{2\sqrt{(a+x)(b-x)}} + \frac{(a+b)\sqrt{a+b}\sqrt{a+b}}{2\sqrt{a+x}\sqrt{b-x}} = \\ &= \frac{a-b+2x+(a+b)^2}{2\sqrt{(a+x)(b-x)}}. \end{aligned}$$

Таким образом, этот табличный интеграл применять нельзя.

3. Корректировка табличного интеграла

Теорема: Справедлива следующая формула:

$$\int \sqrt{\frac{a+x}{b-x}} dx = (a+b) \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{a+x}{b-x}} - \sqrt{(b-x)(a+x)} + C. \quad (6)$$

Доказательство 1.

$$\frac{a+x}{b-x} = t^2, \quad a+x = t^2 b - t^2 x,$$

$$x(1+t^2) = t^2 b - a, \quad x = \frac{t^2 b - a}{1+t^2},$$

$$dx = \frac{2tbdt}{1+t^2} - \frac{t^2 b - a}{(1+t^2)^2} 2tdt,$$

$$\int \sqrt{\frac{a+x}{b-x}} dx = \int t \left[\frac{2tb}{1+t^2} - \frac{t^2 b - a}{(1+t^2)^2} 2t \right] dt =$$

$$= \int \frac{2t^2 b}{1+t^2} dt - \int \frac{t^2 b - a}{(1+t^2)^2} 2t^2 dt =$$

$$= 2b \int \frac{1+t^2-1}{1+t^2} dt -$$

$$- 2b \int \frac{t^4 - t^2 a/b + 2t^2 - 2t^2 + 1 - 1}{(1+t^2)^2} dt =$$

$$= 2b \int dt - 2b \int \frac{1}{1+t^2} dt -$$

$$- 2b \int dt + 2b \int \frac{t^2 a/b + 2t^2 + 1}{(1+t^2)^2} dt =$$

$$= -2b \int \frac{1}{1+t^2} dt +$$

$$+ 2b(a/b+2) \int \frac{t^2+1/(a/b+2)+1-1}{(1+t^2)^2} dt =$$

$$= -2b \operatorname{arctg} t + 2b(a/b+2) \int \frac{dt}{1+t^2} -$$

$$- 2b(a/b+2) \frac{a+b}{a+2b} \int \frac{dt}{(1+t^2)^2} =$$

$$= -2b \operatorname{arctg} t + 2b(a/b+2) \operatorname{arctg} t -$$

$$- 2b \frac{a+2b}{b} \frac{a+b}{a+2b} \frac{1}{2} \left(\frac{t}{1+t^2} + \operatorname{arctg} t \right) + C =$$

$$= -2b \operatorname{arctg} t + 2b(a/b+2) \operatorname{arctg} t -$$

$$- \frac{(a+b)t}{1+t^2} - (a+b) \operatorname{arctg} t + C =$$

$$= (a+b) \left(\operatorname{arctg} t - \frac{t}{1+t^2} \right) + C =$$

$$\begin{aligned}
 &= (a+b)\operatorname{arctg}\sqrt{\frac{a+x}{b-x}} - (a+b)\frac{\sqrt{\frac{a+x}{b-x}}}{1+\frac{a+x}{b-x}} + C = \\
 &= (a+b)\operatorname{arctg}\sqrt{\frac{a+x}{b-x}} - (a+b)\frac{b-x}{a+b}\sqrt{\frac{a+x}{b-x}} + C = \\
 &= (a+b)\operatorname{arctg}\sqrt{\frac{a+x}{b-x}} - \sqrt{(b-x)(a+x)} + C.
 \end{aligned}$$

Теорема доказана.

Доказательство 2.

$$\begin{aligned}
 \frac{df}{dx} &= (a+b)\frac{1}{1+\frac{a+x}{b-x}} \cdot \\
 &\cdot \frac{1}{2}\sqrt{\frac{b-x}{a+x}}\left[\frac{1}{b-x} + (a+x)\frac{-1}{(b-x)^2}(-1)\right] - \\
 &= -\frac{1}{2}\frac{1}{\sqrt{(a+x)(b-x)}}(b-a-2x) = \\
 &= \frac{(a+b)(b-x)}{2(a+b)}\frac{\sqrt{b-x}}{\sqrt{a+x}}\frac{b-x+a+x}{(b-x)^2} - \\
 &= \frac{b-a-2x}{2\sqrt{(a+x)(b-x)}} = \\
 &= \frac{1}{2}\sqrt{\frac{b-x}{a+x}}\frac{a+b}{b-x} - \frac{b-a-2x}{2\sqrt{(a+x)(b-x)}} = \\
 &= \frac{a+b}{2\sqrt{(a+x)(b-x)}} - \frac{b-a-2x}{2\sqrt{(a+x)(b-x)}} = \\
 &= \frac{2a+2x}{2\sqrt{(a+x)(b-x)}} = \sqrt{\frac{a+x}{b-x}}.
 \end{aligned}$$

Теорема доказана.

4. Продолжение решения исходной задачи

Интегрирование дифференциального уравнения (4) в соответствии с (6) дает:

$$\begin{aligned}
 \int_R^r \sqrt{\frac{r}{R-r}} dr &= -\sqrt{\frac{2GM}{R}} \int_0^t dt, \\
 \left[R \operatorname{arctg}\sqrt{\frac{r}{R-r}} - \sqrt{r(R-r)} \right]_R^r &= -\sqrt{\frac{2GM}{R}} \int_0^t dt,
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R \operatorname{arctg}\sqrt{\frac{r}{R-r}} - R\frac{\pi}{2} - \sqrt{r(R-r)} &= -\sqrt{\frac{2GM}{R}}t, \\
 R\left(\frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg}\sqrt{\frac{r}{R-r}}\right) + \sqrt{r(R-r)} &= \sqrt{\frac{2GM}{R}}t. \quad (7)
 \end{aligned}$$

Это решение дифференциальных уравнений (4) и (1) является уравнением движения нормально падающего тела.

Из выражения (2) следует:

$$r = \frac{2GMR}{2GM + Rv^2}.$$

Подстановка этого выражения в (7) дает:

$$\begin{aligned}
 R\left(\frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg}\sqrt{\frac{\frac{2GMR}{2GM + Rv^2}}{R - \frac{2GMR}{2GM + Rv^2}}}\right) + \\
 + \sqrt{\frac{2GMR}{2GM + Rv^2}\left(R - \frac{2GMR}{2GM + Rv^2}\right)} &= \sqrt{\frac{2GM}{R}}t, \\
 R\left(\frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg}\sqrt{\frac{2GMR}{2GMR + R^2v^2 - 2GMR}}\right) + \\
 + \sqrt{\frac{2GMR(2GMR + R^2v^2 - 2GMR)}{(2GM + Rv^2)^2}} &= \sqrt{\frac{2GM}{R}}t, \\
 \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg}\frac{\sqrt{2GMR}}{Rv} + \frac{v\sqrt{2GMR}}{2GM + Rv^2} &= \sqrt{\frac{2GM}{R}}\frac{t}{R}.
 \end{aligned}$$

Это временная функция скорости.

Для получения временной функции ускорения следует (1) подставить в (7).

$$\begin{aligned}
 R\left(\frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg}\sqrt{\frac{(GMa^{-1})^{1/2}}{R - (GMa^{-1})^{1/2}}}\right) + \\
 + \sqrt{(GMa^{-1})^{1/2}(R - (GMa^{-1})^{1/2})} &= \sqrt{\frac{2GM}{R}}t.
 \end{aligned}$$

В соответствии с (7) период падения тела на поверхность планеты равен:

$$\begin{aligned}
 R\left(\frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg}\sqrt{\frac{R_M}{R - R_M}}\right) + \\
 + \sqrt{R_M(R - R_M)} &= \sqrt{\frac{2GM}{R}}T, \quad (8)
 \end{aligned}$$

где R_M – радиус планеты.

В соответствии с (3) скорость тела у поверхности планеты равна:

$$V = -\sqrt{2GM} \sqrt{\frac{1}{R_M} - \frac{1}{R}} \quad (9)$$

Пример.

$R = 7 \cdot 10^6$ м, параметры планеты не отличаются от земных. $R_M = 6,371 \cdot 10^6$ м; $M = 5,9726 \cdot 10^{24}$ кг; $G = 6,6743 \cdot 10^{-11}$ м³/(кг·с²).

В соответствии с (8):

$$\begin{aligned} &7 \cdot 10^6 \left(\frac{\pi}{2} - \arctg \sqrt{\frac{6,371 \cdot 10^6}{(7 - 6,371) \cdot 10^6}} \right) + \\ &+ \sqrt{6,371 \cdot 10^6 (7 - 6,371) \cdot 10^6} = \\ &= \sqrt{\frac{2 \cdot 6,6743 \cdot 10^{-11} \cdot 5,9726 \cdot 10^{24}}{7 \cdot 10^6}} T. \end{aligned}$$

Период падения тела на поверхность планеты равен: $T = 387,275$ с = 6,455 мин.

В соответствии с (9) скорость тела у поверхности планеты равна:

$$\begin{aligned} V = &-\sqrt{2 \cdot 6,6743 \cdot 10^{-11} \cdot 5,9726 \cdot 10^{24}} \cdot \\ &\cdot \sqrt{\frac{1}{6,371 \cdot 10^6} - \frac{1}{7 \cdot 10^6}} = 3353,297 \text{ м/с}. \end{aligned}$$

В таблице представлено сравнение значений периода падения тела на поверхность планеты из примера и полученного на основе использования некорректного табличного интеграла (5).

Таблица

Сравнение результатов расчета периода падения тела

Параметр	Значение
Период падения тела на основе некорректного интеграла (5)	405,169 с
Период падения тела на основе предложенной методики	387,275 с
Абсолютная погрешность	+17,894 с
Относительная погрешность	4,62%

Заключение

Трудно представить, что никто и никогда не искал формулы времени, скорости и ускорения при нормальном свободном падении тела. Однако если при этом использовался табличный интеграл (5), то, конечно, те формулы неверны. Поводом усомниться в интеграле (5) послужило то, что в ряде конкретных случаев значения аргумента у арксинуса превышали единицу.

Корректировка этого интеграла (6) особенно актуальна с учетом его очевидного прикладного характера.

Полученные результаты могут быть полезны при расчетах пассивного гравитационного маневра при межпланетных полетах [4–6] и расчетах отвесного падения небольших небесных тел и отработанных элементов конструкций космических аппаратов [7–10].

Список литературы

- [1] Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике. М. Наука. 1977. 872 с.
- [2] Бермант А. Ф., Араманович И. Г. Краткий курс математического анализа для вузов. М. Наука. 1971. 736 с.
- [3] Справочник машиностроителя. Под ред. Н. С. Ачеркана. М. : Редакция машиностроительной литературы. 1963. 592 с.
- [4] Старинова О. Л., Сергаева Е. А., Шорников А. Ю. Проектно-баллистический анализ миссии длительного исследования астероида Апофис наноспутником с электроракетной двигательной установкой // Космические аппараты и технологии. 2020. № 3. С. 161–170.
- [5] Панько С. П., Цимбал М. С. Измерение скорости космического аппарата // Космические аппараты и технологии. 2015. № 4. С. 25–29.
- [6] Королев В. С. Задачи оптимального маневрирования космических аппаратов для инспектирования или обслуживания системы тел // Космические аппараты и технологии. 2015. № 2. С. 18–23.
- [7] Попов И. П. Расчетные системы отсчета при относительном движении космических объектов // Инженерная физика. 2019. № 3. С. 40–43.
- [8] Попов И. П. Системы отсчета в навигации движущихся объектов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20. № 3. С. 189–192.
- [9] Чеботарев В. Е., Борисов В. И. Разработка алгоритма расчета траектории перехвата ракетой астероида, опасного для планеты Земля // Космические аппараты и технологии. 2012. № 2. С. 30–34.
- [10] Левкина П. А., Сергеев А. В. Характеристики новых объектов космического мусора, обнаруженных в терскольской обсерватории // Научные труды Института астрономии РАН. 2019. Т. 4. С. 306–311.

ELEMENTS OF BALLISTIC CALCULATION
FOR SPACECRAFT GRAVITY ASSIST

I. P. Popov

Kurgan State University, Kurgan, Russian Federation

The purpose of the study is an analytical description of the section of the ballistic trajectory corresponding to the normal fall of the spacecraft on the surface of an atmosphereless planet. In this case, the motion of a normally falling body is characterized by an increasing acceleration of gravity. The problem of the speed, time and acceleration of the normal fall of a body on the planet's surface in the absence of an atmosphere is reduced to solving a second-order differential equation, which is solved by the standard method. A feature of the solution is the formal use of the tabular integral at an intermediate stage. It turned out, however, that his formula is unreliable, namely, the derivative of the right-hand side is not equal to the integrand. It follows from this that the possible existing solutions to this problem, based on the use of the indicated tabular integral, are incorrect. The article presents the correction of this tabular integral, which is an incidental result of the study. In this work, the time equation of motion of a body normally falling on the surface of the planet in the absence of an atmosphere, as well as the time equations of its speed and acceleration are obtained. The results obtained can be useful in calculating passive gravity assist during interplanetary flights and calculating the sheer fall of small celestial bodies and spent structural elements of spacecraft.

Keywords: ballistic trajectory, passive gravity assist, spacecraft, interplanetary flight, celestial body.

References

- [1] Vygodskiy M. Ya. *Spravochnik po vysshey matematike* [Handbook of Higher Mathematics]. Moscow, Science, 1977, 872 p. (In Russian)
- [2] Bermant A. F., Aramanovich I. G. *Kratkiy kurs matematicheskogo analiza dlya vtuzov* [A short course in mathematical analysis for technical colleges]. Moscow, Science, 1971, 736 p. (In Russian)
- [3] *Spravochnik mashinostroyitelya* [Mechanical Engineer Handbook]. Moscow, 1963, 592 p. (In Russian)
- [4] Starinova O. L., Sergaeva E. A., Shornikov A. Yu. Design and ballistic analysis of the mission for long-term study of the asteroid Apophis by a nanosatellite with an electric rocket propulsion system // *Spacecrafts & Technologies*, 2020, vol. 4, no. 3, pp. 161–170. doi: 10.26732/j.st.2020.3.04
- [5] Panko S. P., Tsimbal M. S. Measurement of the velocity of the spacecraft // *The Research of the Science City*, 2015, no. 4, pp. 25–29.
- [6] Korolev V. S. Problem optimum spaceship trajectory to inspect or service system of body // *The Research of the Science City*, 2015, no. 2, pp. 18–23.
- [7] Popov I. P. *Raschetnyye sistemy otscheta pri odnositel'nom dvizhenii kosmicheskikh ob'yektov* [Computational reference systems for the relative motion of space objects] // *Engineering Physics*, 2019, no. 3, pp. 40–43. (In Russian)
- [8] Popov I. P. *Sistemy otscheta v navigatsii dvizhushchikhsya ob'yektov* [Reference systems in the navigation of moving objects] // *Mechatronics, automation, control*, 2019, vol. 20, no. 3, pp. 189–192. (In Russian)
- [9] Chebotarev V. Ye., Borisov V. I. *Razrabotka algoritma rascheta trayektorii perekhvata raketoy asteroida, opasnogo dlya planety Zemlya* [Development of an algorithm for calculating the trajectory of a rocket intercepting an asteroid dangerous for planet Earth] // *Spacecraft & Technologies*, 2012, no. 2, pp. 30–34. (In Russian)
- [10] Levkina P. A., Sergeev A. V. *Kharakteristiki novykh ob'yektov kosmicheskogo musora, obnaruzhennykh v terskol'skoy observatorii* [Characteristics of new objects of space debris discovered at the Terskol observatory] // *Proceedings of the Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences*, 2019, vol. 4, pp. 306–311. (In Russian)

Сведения об авторах

Попов Игорь Павлович – кандидат технических наук, старший преподаватель Курганского государственного университета. Окончил Курганский машиностроительный институт в 1983 году. Область научных интересов: космическая техника, теоретическая механика.

ORCID: 0000-0001-8683-0387

ВЕНТИЛЬ ДЛЯ ДВУХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ

З. А. Юдина✉, **М. И. Синиченко**, **А. П. Ладыгин**,
Ф. К. Синьковский, **А. Д. Кузнецов**

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

На данный момент в космической промышленности актуальной задачей является увеличение эффективности теплоотвода системы терморегулирования космического аппарата. Такую задачу наиболее успешно решает двухфазная система терморегулирования. Надежное функционирование данной системы обеспечивается, в том числе, применением надежных элементов арматуры трубопроводов, способных работать в условиях высокого давления (4,8 МПа) в агрессивной среде (аммиак). В данной работе представлены результаты разработки и испытаний вентиля заправочного и вентиля проходного для двухфазной системы терморегулирования космического аппарата. Описаны и подробно рассмотрены технические решения, принятые для соответствия конструкции техническим требованиям: герметичность посадки клапана на седло корпуса в условиях давления 4,8 МПа, циклы срабатывания (160 открытий/закрытий). Приведены критерии выбора момента затяжки клапана в условиях давления. Описана отработка посадки типа «металл по металлу». Приведены результаты квалификационных испытаний. Описана проблема отработки режимов сварки торцевых многослойных швов для обеспечения необходимой герметичности конструкции. Совокупность примененных конструкторско-технологических решений и результаты наземной квалификации позволяют утверждать, что разработанные устройства исполнительной автоматики являются уникальными по сочетанию технических характеристик, таких как герметичность, ресурс, устойчивость к работе в агрессивных средах.

Ключевые слова: устройство исполнительной автоматики, вентиль, двухфазная система терморегулирования.

Введение

Рост энерговооруженности космических аппаратов (КА) (25 кВт и более) приводит к необходимости применения средств обеспечения термостатирования с большими удельными характеристиками, чем традиционно применяемые системы, построенные на основе монофазного контура с жидким теплоносителем и тепловыми трубами.

Для таких перспективных КА рациональным решением является применение систем терморегулирования с двухфазным жидкостным контуром (СТР сДФК). Данная система позволяет обеспечить большую эффективность теплоотвода и тепловую мощность (при меньших массовых характеристиках) за счет использования тепловой энергии фазового перехода теплоносителя [1–4].

Одним из важнейших элементов СТР сДФК, обеспечивающих регулирование расхода теплоносителя и заправку системы, является запорная и регулирующая арматура (вентили, клапаны регуляторы и т. д.).

Учитывая, что выход из строя любого из этих устройств приводит к отказу всей системы терморегулирования и невозможности выполнения КА целевой задачи, обеспечение надежности их функционирования является актуальной задачей [5].

В данной статье идет речь об СТР сДФК, в которой в качестве рабочей жидкости используется жидкий аммиак. В связи с тем, что данный теплоноситель является агрессивной средой, для безопасной работы с ним подходит ограниченное количество типов уплотнений, обеспечивающих требуемую герметичность в заданном диапазоне температур и давлений при многократном использовании вентиля (циклы открытия/закрытия). Поскольку существующие разработки не отвеча-

✉ u-z-a@yandex.ru

ли всем требованиям, необходимым для работы в составе современных СТР с высокой энергооборуженностью, то возникла необходимость в разработке новых устройств запорной арматуры трубопроводов с требуемыми характеристиками. Несоответствие существующих разработок связано, прежде всего, с их эксплуатацией в среде ЛЗТК-2, не являющейся агрессивной средой.

1. Вентили для СТР с ДФК

В данной статье рассмотрены основные проблемы, возникающие при разработке двух устройств СТР с ДФК, которые были вновь спроектированы для перспективного КА с тепловыделением 25 кВт:

1. Вентиль запорный, предназначенный для заправки магистралей СТР с ДФК (вентиль № 1);

2. Вентиль проходной, предназначенный для интеграции в СТР с ДФК для обеспечения перекрытия магистралей СТР (вентиль № 2).

В табл. 1 приведены требования к различным параметрам, которые предъявлялись при разработке данных устройств. Также в табл. 1 представлены характеристики используемого ранее вентиля аналогичного назначения с похожим принципом работы, но для монофазной СТР.

В табл. 1 приведены требования к различным параметрам, которые предъявлялись при разработке данных устройств. Также в табл. 1 представлены характеристики используемого ранее вентиля аналогичного назначения с похожим принципом работы, но для монофазной СТР.

Таблица 1

Основные требования при разработке вентиля

Требование	Вентиль № 1	Вентиль № 2	Вентиль, используемый в СТР ранее
Назначение	запорный	проходной	запорный
Диапазон рабочего давления, МПа	от 0 до 4,8	от 0 до 4,8	от 0,06 до 0,9
Суммарная негерметичность, л·мкм рт.ст./с	не более $7,36 \cdot 10^{-4}$		$1 \cdot 10^{-3}$
Допустимая негерметичность посадки клапана в закрытом положении в диапазоне рабочего давления, л·мкм рт.ст./с	не более 0,206		не более 0,5
Гидравлическое сопротивление по жидкому аммиаку при температуре 20 °С	не более $2,94 \cdot 10^5$ Па при расходе аммиака 30 г/с	не более 8825 Па при расходе аммиака 61 г/с	требование не предъявляется
Масса, кг	не более 0,5	не более 0,6	не более 0,35
Теплоноситель	аммиак жидкий особой чистоты		ЛЗТК-2
Давление в магистрали СТР, МПа	4,8		0,9
Рабочий диапазон температуры теплоносителя, °С	от -30 до +80		от -100 до +70
Прочность	работоспособность при 7,2 МПа		требование не предъявляется
Ресурс работы (циклы открытия/закрытия)	не менее 160		не менее 100
Количество контуров герметизации	3	1	2
Управление	ручное		

Как видно из табл. 1, конструктивные параметры ранее используемых в СТР вентилях уступают проектируемым по ресурсу работы, требованиям герметичности и допустимому диапазону рабочего давления. Кроме того, некоторые требования, такие как прочность и гидравлическое сопротивление, не предъявлялись вовсе. Очевидно, что существующие вентили не способны обеспечить требуемые параметры для перспективных спутниковых платформ, использующих в своем составе СТР с ДФК.

Модернизация существующей конструкции маловероятна, поскольку для вновь проектируемых вентилях предполагается работа в агрессивной среде, что накладывает определенные ограничения при выборе принципа герметизации конструкции (необходимость использования соединения «металл по металлу»).

Стоит отметить, что трудность проектирования новых вентилях состоит в совокупности предъявляемых требований (длительный ресурс, высокое давление, высокие показатели герметич-

ности, агрессивная среда), поскольку данная задача ранее не стояла перед разработчиками.

Целью данной работы является раскрытие трудностей, связанных с проектированием подобных устройств.

Были проанализированы известные конструкции ручных вентилях, предназначенные для изоляции и соединения участков жидкостной системы терморегулирования космических аппаратов с химически агрессивным теплоносителем.

Так, например, в запорном устройстве [6], состоящим из клапана с эластичным уплотнением, штока с шаровой опорой и седла, причем на шаровой опоре выполнен срез, а на внутренней поверхности клапана выполнен выступ. Данный способ самоустановки клапана не подходит при обеспечении безопасной работы с химически агрессивной жидкостью, так как неизвестны или недоступны эластичные уплотнения, обладающие способностью сохранять герметизирующие свойства при контакте с химически агрессивной жидкостью в заданном диапазоне температур и давлений после выполнения минимально необходимого количества посадок клапана на седло.

В конструкции вентиля [7], содержащего корпус, бугель, запорный орган со штоком, шпindel, соединенный с бугелем ходовой резьбой, муфту, соединяющую шток со шпindelом через промежуточный элемент, промежуточный элемент выполнен в виде стакана из антифрикционного материала, охватывающего головку шпинделя. Герметичность подвижного сопряжения штока с корпусом обеспечивается сальником. В этом прототипе сальник не пригоден для уплотнения от протечки химически агрессивной жидкости. Промежуточный элемент со стаканом из антифрикционного материала внутри увели-

чивает габариты и массу вентиля, что неприемлемо для устройств в составе космических аппаратов.

В вентиле [8] запорный элемент поджат пружиной к штоку, расположенному в направляющей втулке с возможностью осевого перемещения. Герметичность подвижного сопряжения штока с корпусом обеспечивается эластичными кольцами. В данном прототипе пружина не может быть использована для обеспечения обратного хода штока при открывании вентиля, так как она создает дополнительное гидравлическое сопротивление и увеличивает габариты и массу вентиля, что неприемлемо для устройств в составе космических аппаратов. Также неприемлема герметизация с помощью эластичных уплотнений.

Анализ известных конструкций показал, что существующие разработки не способны обеспечить всех требований, предъявляемых к конструкции вентилях для работы в СТР с ДФК в соответствии с приведенными в табл. 1 требованиями.

Таким образом, было необходимо создать конструкцию, обеспечивающую требуемый уровень как суммарной внешней герметичности вентиля при его функционировании, так и герметичности посадки клапана на седло при заданном количестве циклов открытия-закрытия без вышечисленных недостатков.

Конструктивный состав вновь разработанных вентилях представлен на рис. 1 и 2. Конструктивно вентилях отличаются друг от друга лишь формой корпуса, которая обусловлена их назначением в СТР. У вентиля, изображенного на рис. 2, отсутствуют два дополнительных контура герметизации, необходимых для вентилях заправочного. Данный момент будет рассмотрен далее более подробно.

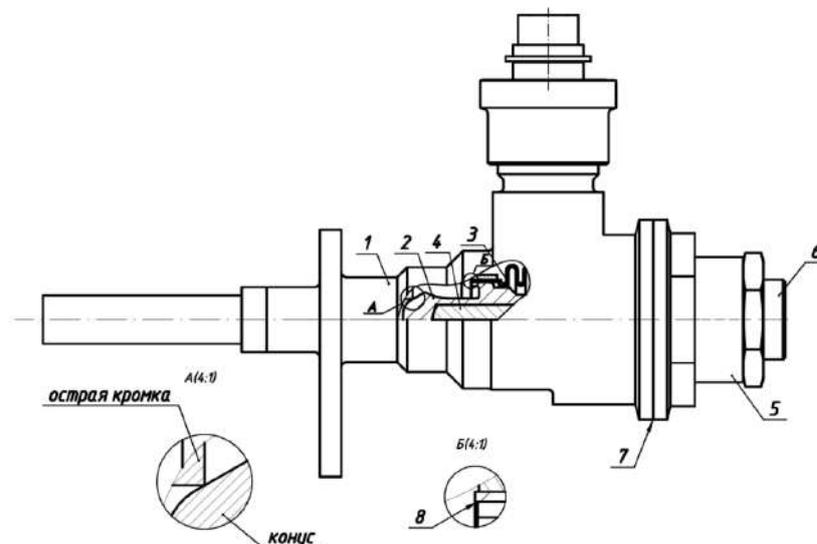


Рис. 1. Вентиль № 1 заправочный: 1 – корпус; 2 – клапан; 3 – сильфон; 4 – стержень; 5 – втулка резьбовая; 6 – ручка; 7 – сварной шов; 8 – электронно-лучевая сварка многослойного торцевого шва (выносной элемент Б)

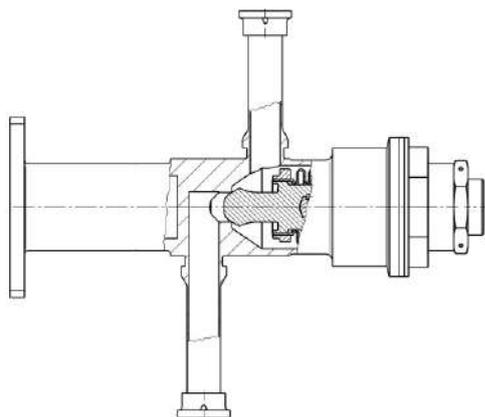


Рис. 2. Вентиль № 2 проходной

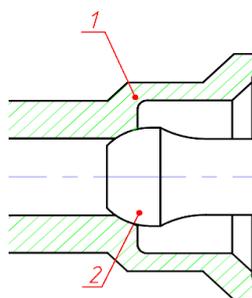


Рис. 3. Посадка клапана по типу «конус-шар»: 1 – корпус; 2 – клапан

Среди всех требований к конструкции представленных вентилях можно выделить основную задачу – обеспечение высоких значений герметичности при значительном ресурсе работы в условиях агрессивной среды (аммиак) высокого давления. Ниже приведены основные конструкторские решения и методы, которые были применены при проектировании данных устройств.

2. Обеспечение герметичности посадки клапана на седло корпуса в условиях давления 4,8 МПа

Герметичность внутренней полости вентиля обеспечивает сильфон (3), привариваемый торцевым многослойным швом (8, выносной элемент Б, рис. 1) к остальным деталям, входящим в сборку. Наличие сварных соединений (8) препятствует герметичной посадке клапана (2) на седло корпуса (1), поскольку даже незначительные смещения оси ввиду температурных деформаций могут привести к неправильному функционированию вентиля. Применение подвижного соединения для деталей (2) и (4) с помощью штифтов обеспечивает самоустановку клапана (2) на седло корпуса (1). Неподвижность данного соединения при закрытии вентиля обеспечивается оптимальным выбором угла касания клапана с седлом корпуса. Данное решение позволяет компенсировать несоосность конструкции, что обеспечивает ее герметичность.

3. Выбор момента затяжки вентиля с учетом всех особенностей эксплуатации и его проверка при многократных циклах срабатывания (160) в диапазоне рабочего давления от 0 до 4,8 МПа

При расчете были учтены следующие факторы: трение в резьбе, трение на торце гайки, давление, оказываемое на внутреннюю полость вентиля, обеспечение необходимого смятия седла корпуса при посадке на него клапана с учетом прочности резьбового соединения деталей (5) и (6), обеспечение необходимого ресурса [9; 10].

4. Отработка посадки клапана на корпус по типу «металл по металлу»

Выбор посадки типа «острая кромка-конус» был обусловлен работой в агрессивной среде (аммиак). Все металлы выбирались в соответствии с их коррозионной стойкостью при работе в этой среде [11].

Для того, чтобы момент, прикладываемый к ручке (6) при закрытии вентиля, был достаточным для создания герметичного соединения, была выбрана посадка клапана на седло по типу «острая кромка-конус». На этапе лабораторно-отрабочных испытаний (ЛОИ), была выбрана посадка клапана, изображенная на рис. 3 по типу «шар-конус», регламентируемая ОСТ [12]. При полученной площади контакта требовался больший, чем в посадке «острая кромка-конус», момент затяжки, а усилие, происходящее от такого момента, превышало прочность резьбового соединения деталей (5) и (6). Кроме того, при посадке «шар-конус» площадь контактирующей поверхности относительно большая, что приводит к ее износу. Данное обстоятельство препятствует герметичной посадке клапана и образованию недолговечного соединения. Посадка по типу «острая кромка-конус» имеет необходимую площадь контакта для формирования посадочного места клапана на корпусе с рассчитанным моментом затяжки на ручке (6). При этом такой площади контакта недостаточно для образования рисок и царапин, нарушающих герметичность [13].

5. Отработка режимов сварки торцевых многослойных швов для обеспечения необходимой герметичности конструкции

Для обеспечения герметичности внутренней полости вентиля был выбран сильфон (3), входящий в состав сильфонного узла и интегри-

руемый в него посредством торцевого многослойного шва (8). Сильфон является покупным элементом, для подтверждения качества которого была проведена рентгеновская 3D томография с целью выявления структуры, определения геометрических параметров и нахождения дефектов в образцах. Размеры сильфона могут варьироваться в рамках ГОСТ Р 55019-2012. Для компенсации варьированности длины сильфона предусмотрен допуск на толщину кромки корпуса под сварку со стороны сварного соединения (7). В рамках ЛОИ были подобраны режимы для сварных соединений, входящих в конструкцию вентиля. Они обеспечивают необходимую герметичность конструкции. Качество каждого

сварного соединения подтверждают образцы-свидетели.

Унифицированная конструкция вентиля (рис. 1 и 2) позволила разработать для них типовую технологический процесс, что значительно ускорило этап отработки конструкции.

Все конструктивные и технологические решения для данных узлов обеспечивают необходимые технические характеристики. На данный момент завершён этап квалификационных испытаний, во время которых вентили подвергались проверкам прочности, герметичности, гидравлического сопротивления, механическим, термовакuumным и ресурсным испытаниям. Результаты представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Технические характеристики вентиля № 1 по результатам квалификационных испытаний после воздействия всех нагрузок согласно программе испытаний

Название характеристики	Фактическое значение	Требование
Суммарная негерметичность, л.мкм рт.ст./с	$6,9 \cdot 10^{-5}$	не более $7,36 \cdot 10^{-4}$
Герметичность посадки клапана, л.мкм рт.ст./с	$1,3 \cdot 10^{-5}$	не более $2,06 \cdot 10^{-1}$
Гидравлическое сопротивление, Па	$3,7 \cdot 10^4$	не более $2,94 \cdot 10^5$
Ресурс, циклов «открытие-закрытие»	180	не менее 160
Масса, кг	0,48	не более 0,5

Таблица 3

Технические характеристики вентиля № 2 по результатам квалификационных испытаний после воздействия всех нагрузок согласно программе испытаний

Название характеристики	Фактическое значение	Требование
Суммарная негерметичность, л.мкм рт.ст./с	$1,35 \cdot 10^{-6}$	не более $7,36 \cdot 10^{-4}$
Герметичность посадки клапана, л.мкм рт.ст./с	$3 \cdot 10^{-5}$	не более $2,06 \cdot 10^{-1}$
Гидравлическое сопротивление, Па	980	не более 8825
Ресурс, циклов «открытие-закрытие»	180	не менее 160
Масса, кг	0,54	не более 0,6

Заключение

Благодаря применению вышеперечисленных конструкторских решений были разработаны два вентиля (заправочный и проходной) с техническими характеристиками, соответствующими требованиям, предъявляемым к работе современных платформ КА, в состав которых входит СТР с ДФК. Все характеристики были подтверждены в ходе наземной экспериментальной отработки.

Очевидно, что полученные требования значительно превосходят параметры ранее ис-

пользуемых конструкций, которые указаны в табл. 1.

Результаты наземной квалификации позволяют утверждать, что разработанные устройства исполнительной автоматики имеют проектные запасы и могут быть успешно применены в перспективных КА. Полученные результаты усовершенствуют известные конструкторско-технологические решения по устройствам исполнительной автоматики. Создание надежной СТР с ДФК без таких устройств не представляется возможным.

Список литературы

- [1] Nesterov D., Dmitriev G. Investigation of loop heat pipe oscillating behavior using numerical simulation // Heat Pipe and Technology. 2015. vol. 6. issue 1–2. pp. 25–49. doi: 10.1615/HeatPipeScieTech.2015012224.
- [2] Ley W., Wittman K., Hallmann W. Handbook of Space Technology, 2009. 884 p.
- [3] Sarafin T. P., Larson W. J. Spacecraft structures and mechanisms. From Concept to Launch, 2007. 850 p.
- [4] Технология производства космических аппаратов : учеб. / Н. А. Тестоедов, М. М. Михнев, А. Е. Михнев [и др.] ; Федер. агентство по образованию, Сиб. гос. аэрокосм. ун-т им. М. Ф. Решетнева, ОАО «Информ. спутниковые системы» им. М. Ф. Решетнева. Красноярск : СибГАУ, 2009. 349 с.
- [5] Надежность КА в современной среде // Новости космонавтики. 2014. Т. 24. № 2 (373). С. 56–69.
- [6] А.С. № 4 21838 (СССР). Самоустанавливающееся запорное устройство / Пасынков Р. А., Кухаренко В. А. – заявл. 06.03.1972 ; опубл. 30.03.1974. Бюл. № 12.
- [7] Баранов А. А., Куршин А. П., Канищев Б. Э., Кожухов В. Б., Лавренкин Ю. А. Вентиль. Пат. № 2105219 Российская Федерация, 2005. Бюл. № 4.
- [8] Барышников Р. С., Майоров В. Д., Макарьянц М. В., Фролов А. В., Юркин А. И. Вентиль заправочный. Пат. № 2554673 Российская Федерация, 2015. Бюл. № 18.
- [9] ГОСТ 19749-84. Соединения неподвижные разъемные пневмогидросистем. Издательство стандартов, 1986. 22 с.
- [10] Биргер И. А., Шорр Б. Ф., Иосилевич Г. Б. Расчет на прочность деталей машин. М. : Машиностроение, 1993. 640 с.
- [11] Материаловедение : учеб. для вузов / Б. Н. Арзамасов [и др.]. 7-е изд. М. : Из-во МГТК, 2005. 648 с.
- [12] ОСТ 92-8656-75. Ниппели. Конструкция и размеры, 1980. 4 с.
- [13] Frankel M. Facility Piping Systems Handbook, 2010. 800 с.

VALVE FOR TWO-PHASE FLUID LOOP

**Z. A. Yudina, M. I. Sinichenko, A. P. Ladigin,
F. K. Sin'kovskiy, A. D. Kuznetsov**

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

Improvement of heat transfer efficiency of the spacecraft thermal control subsystem constitutes a relevant problem for today space industry. Two phase thermal control system presents the most suitable solution for this problem. Implementation of reliable thermal control loop elements constitutes one the major prerequisites for reliability of thermal control systems featuring the operating pressure of 4.8 MPa and ammonia as heat fluid. This paper presents the design and test results of manual valve and fill and drain valve to be operated within the spacecraft two phase thermal control subsystem. The paper provides considerations and detailed description of the technical solutions adopted to ensure compliance with the specification requirements such as operating pressure and plug seat leak tightness under the operating pressure and 160 open/close cycles. Valve plug torque selection criteria are described. The employed design and technical solutions as well as qualification test results have proven that the units designed feature outstanding combination of performances such as leak tightness, life cycle with ammonia as heat fluid.

Keywords: automatics, valve, two-phase fluid loop.

References

- [1] Nesterov D., Dmitriev G. Investigation of loop heat pipe oscillating behavior using numerical simulation // Heat Pipe and Technology, 2015, vol. 6, issue 1–2, pp. 25–49. doi: 10.1615/HeatPipeScieTech.2015012224.
- [2] Ley W., Wittman K., Hallmann W. Handbook of Space Technology, 2009, 884 p.
- [3] Sarafin T. P., Larson W. J. Spacecraft structures and mechanisms. From Concept to Launch, 2007, 850 p.
- [4] Testoyedov N. A., Mikhnev M. M., Mikhnev A. E. *Tekhnologiya proizvodstva kosmicheskikh apparatov* [Technology of spacecraft production]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2009, 352 p. (In Russian)

- [5] *Nadezhnost' KA v sovremennoj srede* [Spacecraft reliability in the modern environment]. *Novosti kosmonavтики*, 2014, vol. 24, no. 2 (373), pp. 56–69. (In Russian)
- [6] Pasyukov R. A., Kukharev V. A. *Samoustanavlivayushcheesya zapornoe ustroystvo* [Self-aligning locking device]. Patent USSR 421838, 1974.
- [7] Baranov A. A., Kurshin A. P., Kanishchev B. E., Kozhukhov V. B., Lavrenkin Yu. A. *Ventil'* [Valve]. Patent RU 2105219, 2005, bulletin no. 4.
- [8] Baryshnikov R. S., Mayorov V. D., Makar'yants M. V., Frolov A. V., Yurkin A. I. *Ventil' zapravochnyy* [Fill and drain valve]. Patent RU 2554673, 2015, bulletin no. 18.
- [9] *GOST 19749-84. Soedineniya nepodvizhnye raz'emnye pnevmogidrosistem* [State Standard 19749-84. Connections are not movable detachable pneumatic hydraulic systems]. Moscow, Standartinform Publ., 1986, 22 p. (In Russian)
- [10] Birger I. A., Shorr B. F., Ioshilevich G. B. *Raschet na prochnost' detaley mashin* [Strength calculation of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993, 640 p. (In Russian)
- [11] Arzamasov B. N. *Materialovedenie* [Materials science]. Moscow, MGTK Publ., 2005, 648 p. (In Russian)
- [12] *OST 92-8656-75. Nippeli. Konstruktsiya i razmery* [Industry Standard 92-8656-75. Union. Design and dimensions]. Moscow, Standartinform Publ., 1980, 4 p. (In Russian)
- [13] Frankel M. *Facility Piping Systems Handbook*. McGraw-Hill, 2010, 800 p.

Сведения об авторах

Кузнецов Артем Дмитриевич – инженер-конструктор 2 категории АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». Окончил Самарский государственный аэрокосмический университет им. С. П. Королева в 2017 году. Область научных интересов: аддитивные технологии, оптимизация конструкций.

Ладыгин Андрей Петрович – начальник отдела АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва в 2004 году. Область научных интересов: разработка и исследование работы агрегатов системы терморегулирования космического аппарата.

Синиченко Михаил Иванович – заместитель начальника отдела АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». Окончил Томский государственный политехнический университет в 1977 году. Область научных интересов: разработка и исследование работы агрегатов системы терморегулирования космического аппарата.

Синьковский Федор Константинович – кандидат технических наук, заместитель директора – главный конструктор отраслевого центра крупногабаритных трансформируемых механических систем АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». Окончил Сибирскую аэрокосмическую академию в 1997 году. Область научных интересов: композиционные материалы, крупногабаритные трансформируемые механические системы, конструкция космического аппарата.

Юдина Зоя Алексеевна – инженер-конструктор 2 категории АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». Окончила Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва в 2017 году. Область научных интересов: разработка и исследование работы агрегатов системы терморегулирования космического аппарата.

ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ИНТЕРФЕЙСНЫХ МОДУЛЕЙ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУР В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРАХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. И. Горностаев

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

Важным этапом при разработке интерфейсных модулей контроля температур для измерительных приборов, реализуемых по магистрально-модульному принципу построения на базе центрального приборного модуля и используемых в составе измерительной системы на космических аппаратах различного назначения, является обеспечение их помехоустойчивой работы при воздействии на измерительную систему совокупности различных видов помех, которые определяют электромагнитную обстановку на космическом аппарате. Статья посвящена анализу характеристик воздействующих на измерительную систему различных видов помех, выявлению путей их проникновения в интерфейсный модуль контроля температур и определению влияния характеристик этих помех на выбор мер по обеспечению требуемой помехоустойчивости интерфейсного модуля контроля температур в составе измерительного прибора. Показано, что пути проникновения помех в интерфейсный модуль контроля температур зависят от частотных и временных характеристик действующих на измерительную систему помех. Меры по ослаблению этих помех необходимо определять после оценки опасности их проникновения в интерфейсный модуль контроля температур по каждому пути отдельно во всем частотном диапазоне их воздействия. По результатам таких оценок следует определять комплекс обоснованных мер по обеспечению помехоустойчивости интерфейсного модуля контроля температур в составе измерительного прибора, реализуемых в совокупности на уровнях проектирования измерительной системы, измерительного прибора и интерфейсного модуля контроля температур.

Ключевые слова: космический аппарат, измерительный прибор, контроль температуры, термопреобразователь сопротивления, электромагнитное поле, помехоустойчивость, ослабление помех.

Введение

В измерительных системах современных космических аппаратов (КА) широко используются измерительные приборы, в основу построения которых положен магистрально-модульный принцип на базе центрального приборного модуля (ЦПМ) с последовательным периферийным интерфейсом (ППИ) [1; 2]. Для таких приборов, в которых предусмотрена функция контроля и измерения температуры на большом числе элементов КА (приборах, узлах конструкции и т. п.), ведутся разработки различных модификаций многоканальных интерфейсных модулей контроля температур (ИМКТ). Одним из важнейших этапов раз-

работки таких модулей является обеспечение их помехоустойчивой работы в составе измерительного прибора, позволяющей при воздействии на измерительную систему совокупности различных видов помех, определяющих электромагнитную обстановку (ЭМО) на КА, сохранить погрешность измерения в пределах допустимых норм.

Измерительная система, предназначенная для контроля и измерения температуры на элементах КА, включает в себя:

- внешние по отношению к измерительному прибору термопреобразователи сопротивления (ТС), устанавливаемые на элементах КА, измерительные кабели, соединяющие выходные цепи ТС к входным цепям каналов измерения ИМКТ, и кабель питания, используемый для подачи на измерительный прибор бортового напряжения от системы электропитания (СЭП);

✉ galiv@iss-reshetnev.ru

• внутренние в измерительном приборе функциональные узлы – ИМКТ, ЦПМ и модуль питания (МП), с помощью которых осуществляется измерение уровней сигналов на входных цепях каналов измерения, аналого-цифровое преобразование результатов измерения и их цифровая обработка.

В такой измерительной системе при отсутствии воздействия на нее различных видов помех в формировании общей погрешности измерения участвуют только составляющие основной погрешности измерения всех звеньев тракта преобразования, вносимые ТС, сопротивлениями проводов линий связи в измерительных кабелях и в ИМКТ многоканальной схемой измерения (МСИ) и аналого-цифровым преобразователем (АЦП) [3].

Однако проникновение помех в любое звено тракта преобразования измерительной системы, если не будут приняты специальные меры по их ослаблению, приведет к возникновению дополнительной погрешности измерения, которая может вызвать недопустимое увеличение общей погрешности измерения, а в отдельных случаях и полную потерю работоспособности ИМКТ. Проблема состоит в том, на каких участках составных частей измерительной системы необходимо принимать такие меры и каким образом осуществлять их реализацию.

Сложность проблемы связана с тем, что источники помех и пути их прохождения до отдельных составных частей измерительной системы распределены в пространстве КА. Воздействие помех происходит в различных частотных и временных диапазонах, момент и факт их появления часто является случайной и неконтролируемой величиной, а местонахождение источников помех заранее неизвестно. Для контроля сложившейся ЭМО на КА возможно использование специальной аппаратуры, позволяющей регистрировать параметры помех в различных точках пространства КА и выявлять наиболее мощные источники

помех, но даже при наличии такой аппаратуры учесть эти результаты контроля возможно только на более поздних этапах проектирования измерительной системы [4; 5]. Кроме того, определение параметров устройств, позволяющих обеспечить необходимое снижение уровня помех в каждом из звеньев тракта преобразования измерительной системы, должно опираться на строгие математические расчеты, что в условиях неопределенности часто приходится делать без достаточного обоснования.

1. Постановка задачи

Рассмотрим измерительную систему (рис. 1), содержащую в своем составе N термопреобразователей сопротивления $ТС_1-ТС_N$, N измерительных кабелей, кабель питания (наличие других кабелей, используемых для связи с прибором, для упрощения задачи не будем рассматривать) и функциональные узлы измерительного прибора – многоканальный ИМКТ, ЦПМ и МП.

Термопреобразователи сопротивления $ТС_1-ТС_N$ размещены на элементах КА для контроля на их поверхностях температур T_1-T_N . Все токопроводящие части конструкции корпуса измерительного прибора и корпусов рамок функциональных узлов соединены гальванически. Внешние (бортовые) кабели измерительного прибора и чувствительные элементы (ЧЭ) ТС экранированы, а внутренние (межмодульные) кабели, размещенные под крышками измерительного прибора, могут быть неэкранированными, экранированными или частично экранированными исходя из особенностей передаваемых сигналов [6].

На такую измерительную систему воздействуют различные виды внешних помех, излучаемых непрерывно в виде электромагнитных полей в процессе работы бортовой аппаратурой (БА) и бортовой кабельной сетью (БКС) и импульсно при электростатических разрядах (ЭСР) на электри-

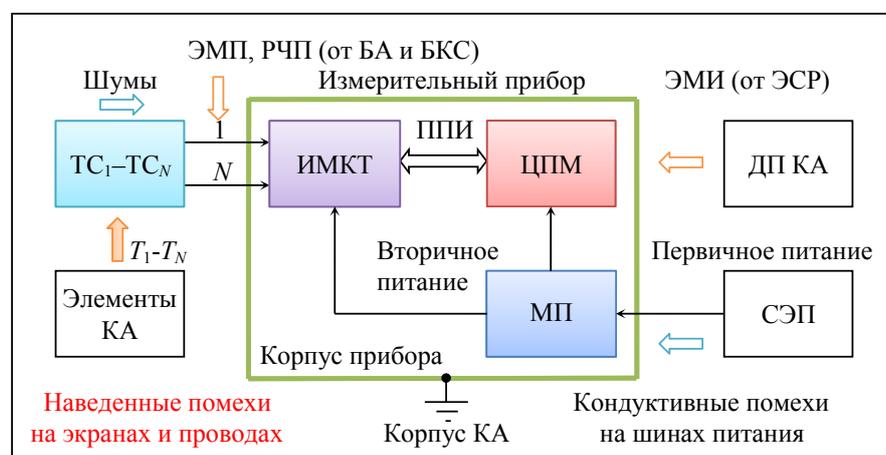


Рис. 1. Структурная схема измерительной системы с указанием воздействующих на нее различных видов помех в сложившейся ЭМО на КА

зуемых диэлектрических поверхностях (ДП) КА, а также возникающих в процессе работы на бортовых шинах системы электропитания (СЭП) и на ЧЭ ТС. Эти помехи в совокупности определяют ЭМО на КА и вызывают образование наведенных помех на электрических цепях измерительной системы, подверженных их воздействию.

В условиях сложившейся ЭМО на КА на измерительную систему могут воздействовать следующие виды помех:

- электромагнитные помехи (ЭМП), вызванные работой энергоемкой БА, непрерывно излучающей в пространство КА напрямую и через кабели БКС значительную часть своей энергии с неравномерным спектром в низкочастотном и высокочастотном диапазонах;

- радиочастотные помехи (РЧП), вызванные работой передающей радиосигналы БА, периодически излучающей в пространство КА напрямую и через кабели БКС значительную часть своей энергии на высоких частотах с относительно узким спектром в радиочастотном диапазоне;

- помехи, вызванные ЭСР на электризуемых ДП КА, приводящими к кратковременному растеканию импульсных токов разряда по поверхностям корпуса КА, корпусов БА и электростатических экранов и излучению в пространство КА мощных электромагнитных импульсов (ЭМИ) энергии с широким спектром в низкочастотном и высокочастотном диапазонах;

- кондуктивные помехи на бортовых шинах СЭП, вызванные изменением режимов работы СЭП в процессе эксплуатации КА, приводящим к пульсациям и скачкообразным изменениям напряжения питания с неравномерным спектром в низкочастотном и высокочастотном диапазонах;

- шумы на ЧЭ ТС, вызванные флуктуациями протекающего через них измерительного тока, приводящими к хаотическому изменению напряжения на выводах ТС с широким энергетическим спектром в низкочастотном диапазоне.

Измерительная система должна удовлетворять требованиям по обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС) с ЭМО на КА [7]. Поэтому на КА с учетом требований по обеспечению ЭМС предусматривают общие меры по ослаблению действующей на измерительную систему совокупности помех:

- корпус измерительного прибора используют в качестве электростатического экрана (его изготавливают, как правило, из электропроводящих материалов или покрывают ими с целью металлизации) и соединяют с корпусом КА;

- кабель питания и измерительные кабели помещают в электропроводящие оплетки, которые также используют в качестве электростатических экранов и соединяют с корпусом КА через корпус измерительного прибора;

- установленные на элементах КА термопреобразователями сопротивления $ТС_1-ТС_N$ закрывают локальными электростатическими экранами, которые соединяют с экранами измерительных кабелей.

Также выполняют необходимые подключения шин первичного питания на выходе СЭП и шин вторичного питания на выходе МП в измерительном приборе (на рис. не показано):

- отрицательный вывод бортовых шин СЭП для исключения возникновения плавающих потенциалов заземляют на корпус КА;

- выходные шины МП, используемые в измерительном приборе для питания аналоговых и цифровых микросхем ИМКТ, для уменьшения уровня проходных помех гальванически развязывают от бортовых шин СЭП (обычно используют трансформаторную развязку);

- отрицательные токоведущие выводы термопреобразователей сопротивления $ТС_1-ТС_N$ подключают к отрицательному выводу выходных шин МП (общая шина питания ИМКТ) через токоведущие линии связи N измерительных кабелей и общие в каналах измерения ИМКТ входные цепи.

При наличии в ПМ гальванической развязки первичных и вторичных шин питания общая вторичная шина питания остается с плавающим потенциалом. Учитывая эту особенность, в ПМ включают высокоомный резистор (~ 100 кОм) между корпусом измерительного прибора и общей вторичной шиной питания.

Кроме того, в дополнение к перечисленным мерам измерительный прибор размещают в области пространства КА с меньшим уровнем воздействия помех.

Однако предусмотренных общих мер по ослаблению действующей совокупности помех в сложившейся ЭМО на КА для измерительной системы оказывается недостаточным из-за недостаточной эффективности экранирования электростатических экранов, используемых для защиты от воздействия электрических полей, и наличием в измерительной системе источников кондуктивных помех, воздействующих на провода линий связи измерительных кабелей и кабелей питания. Необходимо предусмотреть дополнительные меры по ослаблению действующей совокупности помех, которые бы позволили обеспечить требуемую помехоустойчивость ИМКТ в составе измерительного прибора.

При определении дополнительных мер следует исходить из условия, что воздействие помех на измерительную систему не должно приводить к ухудшению качества функционирования ИМКТ (недопустимое увеличение погрешности измерения, сбои в информационных и управляющих сигналах) в пределах значений норм параметров помех, заданных в технических требованиях на

измерительный прибор для соответствующих частотных и временных диапазонов. В отдельных случаях при воздействии на измерительную систему одиночных импульсных помех допускается временное ухудшение функциональных характеристик измерительного прибора, если это время оговорено в технических требованиях. После прекращения воздействия импульсной помехи нормальное функционирование измерительного прибора должно автоматически восстанавливаться.

Для достижения поставленной цели необходимо проанализировать характеристики действующих на измерительную систему помех, определить возможные пути проникновения этих помех в ИМКТ, оценить опасность их проникновения в заданных частотных и временных диапазонах и на основе проведенного анализа определить обоснованные дополнительные меры по их ослаблению, позволяющие обеспечить требуемую помехоустойчивость ИМКТ в составе измерительного прибора.

2. Анализ характеристик действующих на измерительную систему помех и определение путей их проникновения в ИМКТ

Характеристики перечисленных видов помех, воздействующих на измерительную систему, определяются используемым в составе КА бортовым оборудованием, которое имеет свойство в процессе эксплуатации при определенных условиях излучать в пространство КА электромагнитную энергию в различных частотных и временных диапазонах.

Для определения путей проникновения помех в ИМКТ в составе измерительного прибора, от которых зависит выбор средств защиты от их воздействия, необходимо проанализировать, в каких диапазонах генерируются бортовым оборудованием каждый из перечисленных видов помех и на какие составные части измерительной системы направлено их воздействие. Без проведения такого анализа не очевидно, каким образом должна быть организована защита ИМКТ от их воздействия. Защита каждого активного элемента электронной схемы ИМКТ от воздействия помех с использованием, например, фильтров вызовет необоснованное увеличение массогабаритных показателей измерительного прибора, что недопустимо.

Поэтому важно найти комплексное решение, которое бы предусматривало для обеспечения требуемой помехоустойчивости ИМКТ принятие обоснованных защитных мер во всех составных частях измерительной системы и позволило бы минимизировать массогабаритные показатели измерительного прибора. Однако это возможно после детального изучения особенностей воз-

действия на измерительную систему каждого из перечисленных видов помех и проведения оценки опасности их проникновения в ИМКТ. Далее рассмотрим эти особенности более подробно.

Воздействие ЭМП

Наличие ЭМП на КА прежде всего связывают с работой электроэнергетического и электронного оборудования, непрерывно излучающего часть своей энергии в открытое пространство КА в виде электромагнитных волн, причиной которых могут быть генераторы, преобразователи, линии передачи электроэнергии, средства распределения, цифровые устройства БА. Частотный спектр таких помех широкий (захватывает низкочастотный и высокочастотный диапазоны) и как правило неравномерный (на отдельных участках диапазона выделяется спектр узкополосных помех с преобладающими частотными составляющими, определяемыми работой отдельных устройств). Допустимые нормы на уровни ЭМП, действующих в заданной области пространства КА, приводятся в технических требованиях к БА и задаются в пределах частотного диапазона от 1 МГц до 18 ГГц.

В указанном частотном диапазоне влиянию ЭМП подвержены все составные части измерительной системы – ТС, измерительные кабели, кабель питания и измерительный прибор. Наличие в них общих электростатических экранов не обеспечивает полную защиту от воздействия ЭМП. Из-за недостаточной эффективности их экранирования электромагнитное поле проникает сквозь экраны и воздействует в ослабленном виде на ЧЭ ТС, провода линий связи измерительных кабелей и бортовых шин кабеля питания, а также на электрические цепи функциональных узлов измерительного прибора, вызывая в них наводки напряжений и токов помех.

Нижняя граница диапазона воздействия ЭМП находится за пределами полосы пропускания ИМКТ (учитывая большую инерционность изменения температуры на поверхностях элементов КА, полосу пропускания ограничивают низкочастотными фильтрами ~ до 1 кГц) и высокочастотные помехи должны бы быть в ИМКТ отфильтрованы. Тем не менее эти помехи могут быть нежелательным образом выпрямлены и перенесены в область более низких частот вследствие нелинейных характеристик диодов и транзисторов, используемых в МСИ ИМКТ и внутри микросхем, и попасть в полосу пропускания ИМКТ.

При воздействии ЭМП на измерительную систему внешнее электромагнитное поле наибольшее влияние оказывает на провода линий связи измерительных кабелей из-за большой их длины, поэтому для уменьшения такого влияния, учитывая высокую чувствительность МСИ ИМКТ, может потребоваться введение в измерительные кабе-

ли дополнительных электростатических экранов, обеспечивающих защиту проводов линий связи от воздействия ЭМП во всем частотном диапазоне. Влияние электромагнитного поля на кабель питания менее существенно из-за низкого импеданса цепей прохождения помех, поэтому в кабеле питания к дополнительным защитным мерам от воздействия ЭМП не прибегают, ограничиваются лишь фильтрацией помех в измерительном приборе во внутренних цепях МП.

При оценке влияния электромагнитного поля на провода линий связи измерительных кабелей следует учитывать, что эффективность экранирования зависит от длины волны λ излучения (связана с частотой излучения соотношением $f = c/\lambda$, где c – скорость света в вакууме) и от расстояния x от источника до приемника помех. Влияние электромагнитного поля при $x < \lambda/2\pi$ (ближнее поле) происходит через емкостную связь (поле E) и индуктивную связь (поле H), а при $x > \lambda/2\pi$ (дальнее поле) происходит через электромагнитную связь (поля E и H). С ростом частоты излучения за счет емкостной и индуктивной связей в измерительных кабелях увеличивается взаимовлияние между проводами, поэтому на высоких частотах для уменьшения взаимовлияния наряду с дополнительным экранированием может потребоваться и повив проводов.

Необходимо также учитывать, что для обеспечения полного экранирования составных частей измерительной системы от ЭМП на высоких частотах все электростатические экраны не должны иметь каких-либо вырезов (отверстий или щелей), размеры которых превышают $\lambda/2$. Однако на практике это условие из-за ряда конструктивных ограничений не всегда возможно выполнить. В результате в измерительной системе ЭМП воздействуют не только на провода линий связи измерительных кабелей, но и на внутренние цепи функциональных узлов измерительного прибора через зазоры в конструкции его корпуса, что также приводит к проникновению помех в ИМКТ. В этом случае может потребоваться введение в ИМКТ специальных схемотехнических или конструктивных способов защиты от помех.

Воздействие РЧП

РЧП на КА вызваны работой радиоэлектронной аппаратуры, периодически излучающей часть своей энергии в открытое пространство КА в виде электромагнитных волн в радиочастотном диапазоне, источником которых могут быть передатчики навигационных сигналов, средства радиосвязи, радиорелейные линии. Такая аппаратура обеспечивает передачу сигналов в радиочастотном диапазоне (обычно в пределах от 300 МГц до 30 ГГц) на несущих частотах модулированных высокочастотных сигналов с относительно узким частотным спектром, ширина которых определя-

ется частотой модуляции. Частотный спектр РЧП, воздействующих на измерительную систему, находится далеко за пределами полосы пропускания ИМКТ, тем не менее проникновение их в ИМКТ может оказаться нежелательным из-за наличия в спектре передаваемых высокочастотных сигналов модуляционных составляющих.

Вследствие электромагнитной индукции в измерительной системе нежелательному воздействию РЧП подвержены все электрические цепи, связанные с ИМКТ через измерительные кабели, кабель питания и корпус измерительного прибора. Однако и в этом случае внешнее электромагнитное поле наибольшее влияние оказывает на провода линий связи измерительных кабелей, которые из-за большой длины могут выступать в роли радиоантенн. Внешнее электромагнитное поле генерирует в проводах токи, которые могут перемещаться по таким антеннам. Эти токи при прохождении через входные цепи каналов измерения ИМКТ вступают во взаимодействие с усилителем МСИ и могут переводиться в низкочастотные демодулированные сигналы, попадающие в полосу пропускания ИМКТ. Демодуляция проявляется в наложении на полезный сигнал нежелательных низкочастотных модуляционных составляющих сигналов, что вызывает появление на выходе усилителя МСИ постоянного смещения напряжения. В этом случае также может потребоваться введение дополнительных электростатических экранов в измерительные кабели, что позволит обеспечить протекание генерируемых токов в экранах, а не в проводах линий связи, и повив проводов, что позволит уменьшить взаимовлияние между проводами.

Электромагнитное поле, проникающее через зазоры в конструкции корпуса измерительного прибора, может генерировать токи и в тестовых выводах ИМКТ, которые также могут вступать во взаимодействие с усилителем МСИ и привести к появлению на его выходе постоянного смещения напряжения, вызванного выпрямленными токами. В таком случае может потребоваться введение в высокочувствительные цепи ИМКТ радиочастотных фильтров или использование специальной экранирующей конструкции, которые мешают демодуляции нежелательных низкочастотных сигналов.

Воздействие помех, вызванных ЭСР

В создании ЭМО на КА особую роль играют процессы электризации ДП КА под воздействием электронов и ионов окружающей плазмы. В процессе электризации происходит так называемая дифференциальная зарядка ДП, в результате которой между ними возникает значительный градиент потенциала, при котором происходят ЭСР. Параметры ЭСР характеризуются по ГОСТ Р 56515-2015 следующими максимальными

значениями: максимальное напряжение разряда 20 кВ, амплитуда импульса тока разряда до 100 А с длительностью фронта от 10^{-9} до 10^{-7} с [8]. ЭСР могут быть одиночными и периодическими (с частотой появления до 50 Гц в течение нескольких секунд). Напряженность поля вблизи канала ЭСР может достигать до 200 кВ/м. Требования по защищенности и стойкости к воздействию статического электричества к БА, на которую возможно воздействие ЭСР с внешних ДП КА, приводят в технических заданиях на их разработку и устанавливаются согласно п. 8.6 ГОСТ Р 56515-2015.

Проблеме обеспечения стойкости БА к воздействию ЭСР и создания методологии проектирования БА с учетом воздействия поражающих факторов электризации посвящено ряд диссертационных работ [9–11]. На основании результатов проведенных исследований предложены рекомендации по применению методов защиты БА от помех ЭСР и алгоритм разработки мер комплексной защиты БА от помех в БКС, вызванных ЭСР [12; 13]. Рекомендации носят обобщенный характер и применительно к рассматриваемой измерительной системе ориентируют разработчика на проведение анализа особенностей эксплуатации всех составных частей измерительной системы – ТС, измерительных кабелей, кабеля питания и внутренних функциональных узлов измерительного прибора и проведению теоретической оценки их стойкости к факторам ЭСР, а затем определению необходимости и достаточности принимаемых мер по их защите от помех ЭСР. Рассмотрим эти особенности более подробно.

ЭСР на КА могут возникать как между соседними электризуемыми ДП, которые не являются частями рассматриваемой измерительной системы, так и между ними и корпусом измерительного прибора, или локальными экранами элементов КА, или экранами измерительных кабелей и кабелей питания. Условно их называют непрямыми ЭСР и прямыми ЭСР соответственно. Непрямые ЭСР воздействует на измерительную систему посредством излучения в пространство КА импульсных электромагнитных полей, а прямые ЭСР – посредством растекания импульсных токов разряда по поверхностям корпуса измерительного прибора, локальных экранов элементов КА и экранов кабелей, гальванически связанных с корпусом КА.

С позиций ЭМС непрямыми и прямыми ЭСР на КА являются источником излучения опасных импульсных ЭМП (ЭМИ) большой энергии с широким частотным спектром (перекрывает низкочастотный и высокочастотный диапазоны), воздействующих не только на бортовые системы в целом, но и на отдельные элементы и устройства БА. Большая часть энергии ЭМИ при возникновении ЭСР (до 90 %) сосредоточена в низкочастот-

ном диапазоне (при указанных характеристиках ЭСР полоса пропускания импульсов ~ от долей Гц до 10 МГц). Однако необходимо учитывать, что импеданс отдельных цепей прохождения ЭМИ в тракт преобразования измерительной системы неодинаков и имеет зависимость от частоты, поэтому важно проанализировать опасность проникновения ЭМИ в электронные устройства не только в низкочастотном, но и в высокочастотном диапазоне (~ до 1 ГГц).

ЭМИ наиболее опасны когда разряды возникают на печатных платах электронных устройств и воздействуют непосредственно на выводы микросхем. В рассматриваемой измерительной системе наиболее уязвимыми к воздействию ЭМИ являются ЧЭ ТС и измерительные кабели, так как провода их линий связи подключены к входным цепям каналов измерения ИМКТ, соединенными непосредственно с выводами микросхем.

Когда происходят непрямые ЭСР энергия ЭМИ, вызванная излучением электромагнитных полей, проникает через различные участки общего электростатического экрана и воздействует на проводники всех составных частей измерительной системы или (в случае ближнего поля) через емкостную связь по электрическому полю и через индуктивную связь по магнитному полю, или (в случае дальнего поля) через электромагнитную связь, проявление которых обнаруживается на достаточно высоких частотах. В результате в проводниках при воздействии электромагнитных полей индуцируются импульсные напряжения и токи помех, спектральный состав которых находится за пределами полосы пропускания ИМКТ. Такие помехи имеют по отношению к общей шине питания ИМКТ синфазную и дифференциальную составляющие, уровни которых обычно из-за низкого импеданса проводящих поверхностей общего электростатического экрана не превышают долей вольта. Однако из-за наличия в спектре излучаемых электромагнитных полей высокочастотных составляющих, они также могут проникать через разрывы в экранах кабелей и зазоры в конструкции корпуса измерительного прибора и напрямую воздействовать на электрические цепи с высоким импедансом, наводя в них импульсные помехи, уровни которых могут достигать порядка нескольких вольт. Такие уровни наведенных импульсных помех обычно не вызывают прямого повреждения электронных устройств в измерительном приборе, однако могут привести к сбоям в работе ИМКТ из-за появления импульсного смещения напряжения в усилителе МСИ и, как следствие, к нарушению нормального функционирования измерительного прибора. Следует отметить, что в ИМКТ синфазная составляющая помех практически не влияет на результат измерения полезного сигнала, так как для его измерения в МСИ используют усилитель

дифференциального типа. В то же время для ослабления дифференциальной составляющей помехи может потребоваться использовать аналогичные схемотехнические и конструктивные способы защиты от помех, как и для случая воздействия ЭМП.

Еще опаснее воздействие ЭМИ на измерительную систему от прямых ЭСР, в результате которого на корпусе измерительного прибора или на локальных экранах элементов КА и экранах кабелей при растекании тока разряда через точки соединения с корпусом КА возникают наведенные импульсные помехи с повышенными уровнями напряжений (зависят от сопротивлений участков экранов в местах воздействия прямых ЭСР). В спектральном составе таких помех содержатся низкочастотные составляющие (от долей Гц), попадающие в полосу пропускания ИМКТ, которые дают существенный вклад в формировании уровня напряжений наведенных помех. Эти помехи вызывают наибольшую опасность при воздействии на провода линий связи измерительных кабелей и ЧЭ ТС, так как не могут быть отфильтрованы. Попадая через провода линий связи во входные цепи каналов измерения ИМКТ, они могут за счет перенапряжений привести не только к сбоям в работе ИМКТ и нарушению нормального функционирования измерительного прибора, но и вызвать скрытые повреждения и необратимые отказы. Поэтому для измерительных кабелей и ТС существенным моментом является введение дополнительных электростатических экранов, позволяющих в пределах полосы пропускания ИМКТ защитить провода линий связи и ЧЭ ТС от воздействия наведенных импульсных помех.

Следует отметить, что на экранах измерительных кабелей и локальных экранах элементов КА перенапряжения наведенных импульсных помех возникают относительно корпуса измерительного прибора и воздействуют на все входные цепи каналов измерения, включая общую шину питания ИМКТ, прежде всего синфазно, что приводит к проникновению импульсных помех в ИМКТ не через входные цепи, а через внутренние цепи МСИ, связанные с корпусом прибора через паразитные емкости. В этом случае уровень наведенных синфазных помех может быть ослаблен введением синфазного фильтра между общей шиной питания ИМКТ и корпусом прибора или введением между МСИ и корпусом прибора потенциального экрана, соединенного с общей шиной питания ИМКТ. При этом необходимо учитывать, что разнополярные цепи сигнальных линий связи в измерительных кабелях относительно источника наведенных синфазных помех имеют различный импеданс, поэтому между этими цепями будет образовываться дифференциальная составляющая импульсных помех, которая может привести

к перенапряжениям во входных цепях каналов измерения ИМКТ. В этом случае при недостаточной эффективности дополнительного экранирования может потребоваться введение во входные цепи каналов измерения ИМКТ специальных схем защиты от перенапряжений.

Воздействие кондуктивных помех СЭП

Кондуктивные помехи СЭП, воздействующие на измерительный прибор по бортовым шинам через кабель питания, вызваны работой БА КА, шины питания которых объединены на выходе СЭП. Основными источниками таких помех являются импульсные преобразователи напряжения питания, силовые распределительные системы, силовое электронное оборудование. Частотный спектр таких помех ограничен диапазоном от 10 Гц до 100 МГц и в основном сосредоточен в низкочастотной области диапазона. Допустимые нормы на уровни кондуктивных помех в этом диапазоне приводят в технических требованиях на измерительные приборы.

Поскольку отрицательная шина питания СЭП заземлена на корпус КА, то в процессе работы БА на бортовых шинах питания относительно корпуса измерительного прибора могут возникать как дифференциальные, так и синфазные составляющие кондуктивных помех. Дифференциальные помехи возникают вследствие непрерывных пульсаций и переходных процессов выходного напряжения СЭП. Синфазные помехи возникают в цепи соединения СЭП с корпусом КА вследствие протекания токов эмиссии синфазных помех всей совокупности БА КА, подключенных к отрицательной шине питания СЭП. Скачкообразное изменение падения напряжения на проводах бортовых шин питания вследствие перепадов тока нагрузки дают вклад как в синфазную, так и в дифференциальную составляющие помех.

Нижний участок указанного диапазона пересекается с полосой пропускания ИМКТ, поэтому оценку опасности проникновения в ИМКТ дифференциальной и синфазной составляющих помех по шинам питания следует проводить с учетом этой особенности. Дифференциальная составляющая помехи представляет собой наибольшую опасность в нижней части частотного диапазона, так как ее проникновение в ИМКТ происходит через цепи вторичного питания ПМ в основном в полосе пропускания ИМКТ. Синфазная составляющая помехи напротив представляет собой наибольшую опасность в верхней части частотного диапазона, так как ее проникновение в ИМКТ происходит в основном через паразитные емкости с корпусом измерительного прибора. В обоих случаях уровень помех может быть ослаблен введением в цепи первичных и вторичных шин питания ПМ соответствующих дифференциальных и синфазных фильтров.

Воздействие шумов ЧЭ ТС

Шумы ЧЭ ТС, воздействующие на измерительный прибор по линиям связи измерительных кабелей, вызваны флуктуациями протекающего через ЧЭ измерительного тока, формируемого в ИМКТ. Генерация шумов происходит во всех полупроводниковых приборах и резисторах, участвующих в ИМКТ в формировании измерительного тока, и в самом ЧЭ ТС. Шумы на выводах ЧЭ ТС являются результатом генерации шумов во всех этих элементах и представляют собой комбинацию белого и розового шумов.

Первопричиной шумов являются случайные процессы, вследствие этого предсказать величину мгновенной амплитуды шума невозможно. Поэтому амплитуду шума U_n описывают гауссовским (нормальным) распределением на графике плотности шумового напряжения, на котором среднеквадратичное (*RMS*) значение шума U_{nRMS} представляет собой стандартное отклонение σ распределения шума, а зависимость спектральной плотности шума $S(f)$ от частоты описывают графиком для комбинации белого и розового шумов, приведенных в [14].

По графику, отражающему в [14] частотную зависимость спектральной плотности шума $S(f)$, прослеживается, что на высоких частотах доминирует белый шум, а на низких – розовый шум. Для белого шума характерна равномерная спектральная плотность. В этом случае энергия шума будет одинакова в любой заданной полосе частот. Для розового шума энергия шума определяется площадью под кривой спектральной плотности шума между верхней (F_n) и нижней (F_l) частотами полосы. В данном случае энергия шума одинакова в каждой частотной декаде. Это создает спектральную плотность мощности, обратно пропорциональную частоте, из-за чего розовый шум часто называют $1/f$ -шумом. Границу между розовым и белым шумами определяет частота излома F_c .

В полупроводниковых приборах различают две разновидности розового шума – фликкер-шум (*flicker noise*) и шум, вызванный случайными скачками тока (*popcorn noise*).

Фликкер-шум (также называемый $1/f$ -шумом или контактным шумом) – избыточный шум, генерируемый случайными флуктуациями тока, причиной которых являются дефекты в полупроводниковых материалах. Частота, ниже которой интенсивность фликкер-шума начинает превышать интенсивность белого шума, называют частотой излома F_c . Как правило, частота излома лежит в диапазоне от 0,1 Гц до 1 кГц и варьируется в зависимости от источников шума. Фликкер-шум является серьезной помехой во многих электронных приборах, в усилителях низкой частоты, в стандартах частоты и др. Поэтому это явление не обделено вниманием теоретических исследований. Исследованию явле-

ния фликкер-шума и его проявления в электронных приборах посвящено большое количество работ, тем не менее это явление остается недостаточно изученным. Поэтому работы в направлении понимания этого явления и поиска новых методов борьбы с ним продолжают [15; 16].

Шум, вызванный случайными скачками тока (также называемый импульсным шумом – *burst noise*) – это низкочастотные модуляции тока из-за захвата и эмиссии носителей заряда, причиной которого является загрязнение полупроводниковых материалов ионами тяжелых металлов. Эти скачки носят случайный характер с частотой ниже 100 Гц и характеризуются дискретной амплитудой и длительностью от 1 мс до 1 с.

Фликкер-шумы и шумы, вызванные случайными скачками тока, от всех источников суммируются согласно правилу сложения среднеквадратичных значений. После чего они описываются одним источником, действующим на выходе полупроводникового устройства, и характеризуются одной результирующей спектральной плотностью шума и одной частотой излома.

Следует отметить, что суммарный уровень шума на выводах ЧЭ ТС обычно невелик, поэтому при невысоких требованиях к погрешности измерения его влиянием на результаты измерения обычно пренебрегают. Однако при необходимости проведения прецизионных измерений пренебрегать влиянием шума на результаты измерения уже нельзя. Необходимо производить оценку его влияния в зависимости от параметров МСИ в ИМКТ.

Уровень шума на выводах ЧЭ ТС зависит от значения измерительного тока – чем меньше ток, тем больше составляющая шума по сравнению с полезным сигналом. Однако увеличение измерительного тока через ЧЭ ТС хотя и приводит к увеличению отношения сигнал/шум, но при этом создает другую проблему, свойственную ТС – это явление самонагрева ЧЭ, в результате которого появляется ошибка измерения. Поэтому соотношение сигнал-шум может быть отрегулировано в МСИ ИМКТ оптимальным выбором значения измерительного тока при импульсном опросе ЧЭ ТС.

Белый шум может быть легко ограничен низкочастотными фильтрами, определяющими полосу пропускания ИМКТ. С розовым шумом дело обстоит намного сложнее. Он не может быть ослаблен введением низкочастотных фильтров, так как его энергетический спектр сосредоточен в полосе пропускания ИМКТ. Поскольку розовый шум заметно проявляется на частотах ниже частоты излома F_c , то результат его воздействия на интервале измерения менее $1/F_c$ будет приводить к фиксированному смещению напряжения в усилителе МСИ ИМКТ. Однако это смещение может быть уменьшено применением метода стабилизации прерыванием [16].

3. Влияние характеристик действующих на измерительную систему помех на определение мер по обеспечению помехоустойчивости ИМКТ

Результаты проведенного анализа основных характеристик действующих на измерительную систему помех и выявленные пути их проникновения в ИМКТ сведены в таблицу. Из табл. 1 видно, что возможные пути проникновения помех в ИМКТ определяются не только местом их воздействия на измерительную систему, но и зависят от их частотных и временных характеристик.

Проникновение в ИМКТ помех, которые воздействуют на измерительную систему посредством излучения электромагнитных полей (ЭМП, РЧП и помехи при не прямых ЭСР), происходит за пределами полосы пропускания ИМКТ. Эти помехи проникают в ИМКТ в зависимости от длины волны излучения либо через электростатические экраны и распространяются по проводам измерительных кабелей и кабеля питания, либо через зазоры в конструкции корпуса измерительного прибора и распространяются по внутренним цепям МСИ ИМКТ. При этом по отношению к входным и внутренним цепям МСИ образуются синфазные и дифференциальные составляющие помех. В обоих случаях помехи могут быть нежелательным образом выпрямлены в МСИ и перенесены в область более низких частот и попасть в поло-

су пропускания ИМКТ. В качестве мер по ослаблению таких помех целесообразно использовать дополнительное экранирование и повив проводов измерительных кабелей, а в высокочувствительных цепях ИМКТ либо вводить радиочастотные фильтры, либо использовать специальную экранирующую конструкцию.

Проникновение в ИМКТ помех, которые воздействуют на измерительную систему при прямых ЭСР, происходит как в пределах полосы пропускания ИМКТ, так и за ее пределами. Эти помехи проникают в ИМКТ за счет наведенных помех на электростатических экранах и корпусе измерительного прибора при растекании импульсных токов разряда, в результате которых возникают вторичные переменные или постоянные электрические поля, генерирующие токи помех в проводах кабелей и во внутренних цепях МСИ ИМКТ. При этом также, как и при излучении электромагнитных полей, по отношению к входным и внутренним цепям МСИ образуются синфазные и дифференциальные составляющие помех. Такие помехи вследствие импульсного характера воздействия могут приводить не только к кратковременным смещениям напряжения на выходе усилителя МСИ, но и к перенапряжениям во входных цепях ИМКТ. Поэтому в случае недостаточной эффективности дополнительного экранирования в измерительных кабелях может потребоваться введение во входные цепи каналов измерения ИМКТ специальных схем защиты от перенапряжений.

Таблица 1

Результаты анализа основных характеристик действующих на измерительную систему помех и выявленные пути их проникновения в ИМКТ

Тип помех	Частотный диапазон	Спектральный состав	Характер воздействия	Пути проникновения
ЭМП	1 МГц – 18 ГГц	Широкий неравномерный частотный спектр (на отдельных участках диапазона выделяется спектр узкополосных помех с преобладающими частотными составляющими)	Непрерывное излучение электромагнитных полей	1. По проводам линий связи измерительных кабелей при воздействии прошедших полей через электростатические экраны
РЧП	300 МГц – 30 ГГц	Относительно узкий частотный спектр на несущих частотах модулированных высокочастотных сигналов, ширина которых определяется частотой модуляции	Периодическое излучение электромагнитных полей	2. По внутренним цепям функциональных узлов измерительного прибора при воздействии прошедших полей через зазоры в конструкции его корпуса
Помехи ЭСР	1 МГц – 1 ГГц при не прямых ЭСР	Широкий частотный спектр, в котором до 90 % энергии сосредоточено в низкочастотной области (полоса пропускания импульсов ~ до 10 МГц), остальная энергия – в высокочастотной области (~ до 1 ГГц)	Импульсное излучение электромагнитных полей	3. По проводам измерительных кабелей и кабеля питания при воздействии наведенных помех на электростатических экранах
	Доли Гц – 1 ГГц при прямых ЭСР		Импульсное растекание токов разряда по электростатическим экранам	

Продолжение таблицы 1

Кондуктивные помехи СЭП	10 Гц – 100 МГц	Широкий частотный спектр, в котором энергия сосредоточена в основном в низкочастотной области	Пульсирующее и скачкообразное изменение напряжения на бортовых шинах СЭП	4. По проводам бортовых шин кабелей питания при эмиссии кондуктивных помех всей совокупности БА КА
Шумы ЧЭ ТС	$f > F_c$ для белого шума	Равномерная спектральная плотность шума $S(f)$ (энергия шума одинакова в любой заданной полосе частот)	Хаотическое изменение напряжения на выводах ТС Примечание: F_c – частота излома на графике спектральной плотности шума $S(f)$ [14]	5. По проводам линий связи измерительных кабелей при импульсном опросе ЧЭ ТС измерительным током, формируемым в ИМКТ
	$f < F_c$ для розового шума ($1/f$ -шума)	Спектральная плотность шума $S(f)$ растет с понижением частоты по закону, близкому к $1/f$ (энергия шума одинакова в каждой декаде частот)		

98

Проникновение в ИМКТ кондуктивных помех СЭП также происходит в пределах полосы пропускания ИМКТ и за ее пределами. Эти помехи распространяются по проводам кабеля питания и проникают в ИМКТ в виде дифференциальной составляющей через шины вторичного питания МП и в виде синфазной составляющей через внутренние цепи МСИ. Дифференциальная составляющая оказывает существенное влияние на ИМКТ в области низких частот в пределах полосы пропускания, а синфазная составляющая напротив – в области высоких частот за пределами полосы пропускания. В обоих случаях уровень таких помех может быть ослаблен введением в цепи первичных и вторичных шин питания ПМ соответствующих дифференциальных и синфазных фильтров.

Проникновение в ИМКТ шумов ЧЭ ТС происходит в пределах полосы пропускания ИМКТ. Это вызвано тем, что действующие шумы на ЧЭ ТС (белый и розовый) распространяются по сигнальным проводам измерительных кабелей и воздействуют только на дифференциальные входы МСИ ИМКТ. При таком воздействии влияние шумов на ИМКТ происходит в основном на низких частотах, а на высоких частотах шумы легко ослабляются низкочастотными фильтрами, определяющими полосу пропускания ИМКТ. В пределах полосы пропускания ИМКТ в качестве мер по ослаблению действующих шумов на ЧЭ ТС

может быть в случае белого и розового шумов повышение соотношения сигнал/шум путем выбора оптимального значения измерительного тока при импульсном опросе ЧЭ ТС, и в случае розового шума дополнительное применение метода стабилизации прерыванием.

Заключение

Проведенный анализ характеристик действующей на измерительную систему в заданной области пространства КА совокупности различных видов помех и путей их проникновения в ИМКТ показал, что меры по ослаблению этих помех, позволяющие обеспечить требуемую помехоустойчивость ИМКТ в составе измерительного прибора, должны определяться после оценки опасности их проникновения в ИМКТ по каждому пути отдельно во всем частотном диапазоне их воздействия.

Проведение таких оценок позволит в дополнение к общим мерам по ослаблению действующей на измерительную систему совокупности помех, предусмотренным на уровне КА, также определить комплекс обоснованных мер по обеспечению помехоустойчивости ИМКТ в составе измерительного прибора, которые должны реализовываться в совокупности на уровнях проектирования измерительной системы, измерительного прибора и ИМКТ.

Список литературы

- [1] Горностаев А. И., Капустин А. Н., Зубавичус В. А., Колесников С. М. Применение магистрально-модульного принципа при построении бортовой аппаратуры бортового комплекса управления космических аппаратов // Решетневские чтения : материалы XIII Междунар. науч. конф. Красноярск. 2009. Ч. 1. С. 20–22.
- [2] Горностаев А. И. Блок управления нагревателями аппаратуры космического аппарата. Пат. № 2660098, Российская Федерация, 2018. Бюл. № 19.
- [3] Горностаев А. И. Оптимизация структуры унифицированного многоканального интерфейсного модуля контроля температур для измерительных приборов космических аппаратов // Космические аппараты и технологии. 2019. Т. 3. № 3. С. 171–183. doi: 10.26732/2618-7957-2019-3-171-183

- [4] Горностаев А. И. Контроль параметров помех на шинах питания бортовой аппаратуры в служебных системах космического аппарата // Известия вузов. Приборостроение. 2008. № 8. С. 28–33.
- [5] Горностаев А. И., Капустин А. Н., Школьный В. Н., Кольцов А. В. Проблема непрерывного контроля кондуктивных помех на шинах питания бортовой аппаратуры при летной эксплуатации космических аппаратов // Авиакосмическое приборостроение. 2011. № 12. С. 34–38.
- [6] Долганов Е. С., Горностаев А. И. Моделирование экранированного гибкого печатного кабеля в системе TALGAT // Решетневские чтения : материалы XIII Междунар. науч. конф. Красноярск. 2009. Ч. 1. С. 23–25.
- [7] ГОСТ Р 56529-2015. Совместимость космической техники электромагнитная. Общие требования и методы испытаний. М. : Стандартинформ, 2016.
- [8] ГОСТ Р 56515-2015. Аппараты космические автоматические и системы бортовые служебные космических аппаратов. Общие требования по защищенности и стойкости к воздействию электрофизических факторов космического пространства и статического электричества. М. : Стандартинформ, 2019.
- [9] Соколов А. Б. Обеспечение стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию электростатических разрядов : дисс. ... д-ра техн. наук: 05.12.04. М. 2009. 236 с.
- [10] Костин А. В. Методика и средства оценки воздействия электромагнитного поля электростатического разряда на бортовую аппаратуру космических аппаратов : дисс. ... канд. техн. наук: 05.12.04. Самара. 2015. 188 с.
- [11] Абрамешин А. Е. Методология проектирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов с учетом воздействия поражающих факторов электризации : дисс. ... д-ра техн. наук: 05.12.04. М. 2017. 262 с.
- [12] Костин А. В., Пиганов М. Н. Разработка рекомендаций по применению методов защиты бортовой аппаратуры от помех электростатического разряда // Международный научно-исследовательский журнал. 2015. № 7. С. 54–56.
- [13] Костин А. В., Пиганов М. Н. Алгоритм разработки мер комплексной защиты бортовой аппаратуры космических аппаратов от помех в бортовой кабельной сети, вызванных электромагнитным полем электростатического разряда // Международный научно-исследовательский журнал. 2015. № 7. С. 57–59.
- [14] Эдвардс С. Оптимизация шумовых параметров сигнальных цепей. Часть 1. Шум в полупроводниках – предотвратим или неизбежен? // Электронные компоненты. 2013. № 10. С. 9–15.
- [15] Загадка фликкер-шума разгадана [Электронный ресурс]. URL: habr.com/ru/post/262015/ (дата обращения: 15.04.2021).
- [16] 1/f-шум: понимание и методы борьбы [Электронный ресурс]. URL: krs.terraelectronica.ru/news/6096 (дата обращения: 15.04.2021).

FEATURES OF ENSURING NOISE IMMUNITY OF INTERFACE MODULES FOR TEMPERATURE CONTROL IN MEASURING INSTRUMENTS OF SPACECRAFT

A. I. Gornostaev

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

An important stage in the development of temperature control interface modules for measuring instruments, implemented according to the main-modular principle of construction on the basis of a central instrument module and used as part of a measuring system on spacecraft for various purposes, is to ensure their noise-immune operation when the measuring system is exposed to a combination of various types of interference which determine the electromagnetic environment on the spacecraft. The article is devoted to the analysis of the characteristics of various types of interference affecting the measuring system, identifying the ways of their penetration into the temperature control interface module and determining the influence of the characteristics of these interference on the choice of measures to ensure the required noise immunity of the temperature control interface module as part of the measuring device. It is shown that the paths of interference penetration into the interface temperature control module depend on the frequency and time characteristics of the interference affecting the measuring system. Measures to mitigate these interference must be determined after assessing the danger of their penetration into the interface temperature control module for each path separately in the entire frequency

range of their impact. Based on the results of such assessments, a set of reasonable measures should be determined to ensure the noise immunity of the interface temperature control module as part of the measuring device, implemented in combination at the design levels of the measuring system, the measuring device and the interface temperature control module.

Keywords: spacecraft, measuring instrument, temperature control, thermal resistance converter, electromagnetic field, noise immunity, noise mitigation.

References

- [1] Gornostaev A. I., Kapustin A. N., Zubavichus V. A., Kolesnikov S. M. *Primeneniye magistral'no-modul'nogo printsipa pri postroyenii bortovoy apparatury bortovogo kompleksa upravleniya kosmicheskikh apparatov* [The use of the trunk-modular principle in the construction of the onboard equipment of the onboard complex control spacecraft]. Reshetnev readings: materials of the XIII International scientific conference, Krasnoyarsk, 2009, Part 1, pp. 20–22. (In Russian)
- [2] Gornostaev A. I. *Blok upravleniya nagrevatelyami apparatury kosmicheskogo apparata* [Control unit for space vehicle equipment heaters]. Patent RU 2660098, 2018, bulletin no. 19.
- [3] Gornostaev A. I. Optimization of the structure of the unified multi-channel interface temperature control module for measuring instruments of spacecraft // *Spacecraft & Technologies*, 2019, vol. 3, no. 3, pp. 171–183. doi: 10.26732/2618-7957-2019-3-171-183
- [4] Gornostaev A. I. *Kontrol' parametrov pomekh na shinakh pitaniya bortovoy apparatury v sluzhebnykh sistemakh kosmicheskogo apparata* [Monitoring of interference parameters on the power supply buses of the onboard equipment in the spacecraft service systems] // *Proceedings of the universities. Instrument making*, 2008, no. 8, pp. 28–33. (In Russian)
- [5] Gornostaev A. I., Kapustin A. N., Shkolny V. N., Koltsov A. V. *Problema nepreryvnogo kontrolya konduktivnykh pomekh na shinakh pitaniya bortovoy apparatury pri letnoy ekspluatatsii kosmicheskikh apparatov* [The problem of continuous monitoring of conducted interference on the power buses of onboard equipment during flight operation of spacecraft] // *Aerospace instrumentation*, 2011, no. 12, pp. 34–38. (In Russian)
- [6] Dolganov E. S., Gornostaev A. I. *Modelirovaniye ekranirovannogo gibkogo pechatnogo kabelya v sisteme TALGAT* [Simulation of a screened flexible printed cable in the TALGAT system]. Reshetnev readings: materials of the XIII International scientific conference, Krasnoyarsk, 2009, Part 1, pp. 23–25. (In Russian)
- [7] *GOST R 56529-2015. Sovmestimost' kosmicheskoy tekhniki elektromagnitnaya. Obshchiye trebovaniya i metody ispytaniy* [State Standard R 56529-2015. Electromagnetic compatibility of space technology. General requirements and test methods]. Moscow, Standartinform, 2016. (In Russian)
- [8] *GOST R 56515-2015. Apparaty kosmicheskoye avtomaticheskoye i sistemy bortovyye sluzhebnyye kosmicheskikh apparatov. Obshchiye trebovaniya po zashchishchennosti i stoykosti k vozdeystviyu elektrofizicheskikh faktorov kosmicheskogo prostranstva i staticheskogo elektrichestva* [State Standard R 56515-2015. Automatic space vehicles and onboard service spacecraft systems. General requirements for protection and resistance to the effects of electrophysical factors of outer space and static electricity]. Moscow, Standartinform, 2019. (In Russian)
- [9] Sokolov A. B. *Obespecheniye stoykosti bortovoy radioelektronnoy apparatury kosmicheskikh apparatov k vozdeystviyu elektrosticheskikh razryadov* [Ensuring stability of the onboard radioelectronic equipment of spacecraft to the effects of electrostatic discharges] : Doct. Diss. Moscow, 2009, 236 p. (In Russian)
- [10] Kostin A. V. *Metodika i sredstva otsenki vozdeystviya elektromagnitnogo polya elektrosticheskogo razryada na bortovuyu apparaturu kosmicheskikh apparatov* [Methodology and means of assessing the effect of the electromagnetic field of an electrostatic discharge on the onboard equipment of spacecraft] : Cand. Diss. Samara, 2015, 188 p. (In Russian)
- [11] Abrameshin A. E. *Metodologiya proyektirovaniya bortovoy radioelektronnoy apparatury kosmicheskikh apparatov s uchetom vozdeystviya porazhayushchikh faktorov elektrizatsii* [Methodology for designing on-board radioelectronic equipment for spacecraft taking into account the impact of the damaging factors of electrification] : Doct. Diss. Moscow, 2017, 262 p. (In Russian)
- [12] Kostin A. V., Piganov M. N. *Razrabotka rekomendatsiy po primeneniyu metodov zashchity bortovoy apparatury ot pomekh elektrosticheskogo razryada* [Development of recommendations on the application of methods for protecting on-board equipment from electrostatic discharge interference] // *International scientific research journal*, 2015, no. 7, pp. 54–56. (In Russian)
- [13] Kostin A. V., Piganov M. N. *Algoritm razrabotki mer kompleksnoy zashchity bortovoy apparatury kosmicheskikh apparatov ot pomekh v bortovoy kabel'noy seti, vyzvannykh elektromagnitnym polem elektrosticheskogo razryada* [Algorithm for the development of measures for the integrated protection of spacecraft on-board equipment from interference in the on-board cable network caused by the electromagnetic field of an electrostatic discharge] // *International scientific research journal*, 2015, no. 7, pp. 57–59. (In Russian)

- [14] Edwards S. *Optimizatsiya shumovykh parametrov signal'nykh tsepey. Chast' 1. Shum v poluprovodnikakh – predotvratim ili neizbezhen?* [Optimization of noise parameters of signal circuits. Part 1. Noise in semiconductors – preventable or unavoidable?] // *Electronic components*, 2013, no. 10, pp. 9–15. (In Russian)
- [15] The mystery of flicker noise has been solved. Available at: habr.com/ru/post/262015/ (accessed 15.04.2021).
- [16] $1/f$ -noise: understanding and methods of struggle. Available at: krs.terraelectronica.ru/news/6096 (accessed 15.04.2021).

Сведения об авторе

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

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ СИНХРОНИЗАЦИИ РАЗНЕСЕННЫХ НАЗЕМНЫХ ПУНКТОВ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

Р. Б. Ковалев¹, В. В. Корниенко², В. Н. Ратушняк³ ✉

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

² Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
г. Томск, Российская Федерация

³ Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск, Российская Федерация

Значительное число патентов и публикаций в открытой печати показывает на сегодняшний день интенсивность проводимых исследований по созданию новых методов синхронизации и специализированной наземной аппаратуры частотно-временной синхронизации. В статье рассматривается реализация автономной системы синхронизации между наземными пунктами спутниковой связи, которая применяется в условиях неблагоприятного приема или отсутствия сигналов глобальных навигационных спутниковых систем. Представлены исследования по оценке погрешности временной синхронизации территориально разнесенных наземных пунктов спутниковой связи. Рассмотрены основы построения приемной аппаратуры радиотехнической системы и произведен расчет взаимной корреляции опорного сигнала приемной аппаратуры и принятого входного сигнала синхронизации. Приведены результаты натурных испытаний аппаратуры взаимной синхронизации, где определялась потенциальная точность синхронизации оборудования на наземных объектах с заранее неизвестными координатами, при этом аппаратура синхронизации обеспечивала измерение времени распространения сигнала с одного наземного объекта к другому с формированием универсальных шкал времени на пунктах. Способ взаимной синхронизации связанных пунктов осуществляется дуплексным методом на частоте 1065 МГц (запрос) и 625 МГц (ответ) фазокодоманипулируемыми сигналами с базой, равной 1023 и длительностью 0,1 мкс.

Ключевые слова: наземный пункт, шкала времени, система синхронизации, высокостабильная опорная частота, погрешность шкалы времени.

Введение

Возможность выполнять высокоточные измерения координат объектов и осуществлять синхронизацию шкал времени с помощью ГЛОНАСС в любой точке земного шара не исключает возможности использования в наземных пунктах спутниковой связи автономных навигационных средств и средств синхронизации. Необходимость этого обусловлена тем, что в тех или иных районах земной поверхности точностные характеристики ГЛОНАСС в значительной степени ослабевают и снижаются до минимального уровня [1–6]. Причинами этого может быть неблагоприятный геометрический фактор, ограничения радиови-

димости космических аппаратов, неполнота сети и масса других обстоятельств. Особенно это касается северных и арктических территорий Российской Федерации. Однако потребители навигационного сигнала, в том числе и наземные пункты спутниковых систем связи, предъявляют все более высокие требования к доступности и надежности данных о местоположении и системной шкале времени. На сегодняшний день глубина проработки вопросов теории и возможных направлений решений задач синхронизации наземных пунктов систем спутниковой связи не соответствует запросам практики. Указанные задачи являются актуальными и полностью согласуются с принятой в России концепцией Единой системы координатно-временного и навигационного обеспечения. Вопросам синхронизаций радиотехнических систем посвящены исследования и работы

✉ oborona-81@yandex.ru

таких авторов как А. Д. Аргунова, С. Н. Малюкова, В. Г. Боровицкого и др. [7].

1. Оценка погрешности синхронизации приемной аппаратуры наземных пунктов спутниковой связи

Система временной синхронизации является важной частью мультипозиционных активных или пассивных наземных радиотехнических систем. Погрешность временной синхронизации наземных объектов должна быть меньше, чем σ_i/c , где σ_i – ошибка измерения координат, c – скорость света. Например, ошибка синхронизации в масштабе времени должна быть меньше 10 нс для достижения ошибки измерения координат менее чем 10 метров. Такая высокая точность может быть обеспечена двухсторонней передачей сигналов синхронизации в диапазоне ультравысоких частот между разнесенными пунктами сети наземных станций спутниковой связи [8].

Шкала времени представляет собой двоичную последовательность, синхронизированную с опорным сигналом и формируемую на ведущем пункте. Опорный сигнал синхронизирует псевдослучайную m -последовательность с периодом 1023 знака и длительностью составляющего символа в 100 нс. Ультравысокочастотный (УВЧ) сигнал синхронизации представляет собой сдвинутый по фазе несущий УВЧ сигнал с частотой 1065 МГц, промодулированный с помощью псевдослучайного сигнала. Основная доля диапазона частот УВЧ сигнала составляет 20 МГц. Передатчик ведущего пункта излучает синхроимпульсы турникетной антенной, имеющей всенаправленную диаграмму направленности в горизонтальной плоскости. В периферийном (ведомом) пункте m -последовательность синхронизируется с помощью сигнала, полученного от ведущего пункта и модулирует УВЧ несущий сигнал с частотой 625 МГц. Несущий сигнал с фазовым сдвигом излучается также изотропной антенной. Принятый сигнал синхронизирует m -последовательность приемника ведущего пункта. Синхроимпульсы переданных и полученных последовательностей формируют входные сигналы для измерителя временных интервалов.

В ходе проведения натуральных испытаний аппаратуры взаимной синхронизации определялась потенциальная точность синхронизации оборудования на наземных объектах с заранее неизвестными координатами, при этом аппаратура синхронизации обеспечивала измерение времени распространения сигнала с одного наземного объекта к другому и формировала универсальные шкалы времени на пунктах. Измеренная временная задержка состоит из двух частей. Первая составля-

ющая включает в себя аппаратную компоненту, и вторая связана с условиями распространения синхронизирующего сигнала.

Главные факторы сбоя счета времени распространения радиоволны для радиоканала, находящегося около поверхности Земли, – это непостоянность скорости радиоволн и рассеяние радиоволн, вызванное разнородностью рельефа. Уравнение для вычисления скорости радиоволны в пространстве с коэффициентом преломления n имеет вид: $c = c_0/n$, где c_0 – скорость радиоволны для области свободного распространения.

Коэффициент преломления зависит от атмосферного давления, температуры и влажности воздуха. Уравнение для коэффициента преломления имеет вид:

$$n = 1 + N \cdot 10^{-6},$$

где $N = 200...400$ для зон вблизи поверхности Земли.

Уравнение для временной задержки распространения радиоволны имеет вид [9]:

$$\tau_d = \frac{1}{c_0} \cdot \int_L n(s) dS, \quad (1)$$

где интегрирование выполнено для радиоканала, соответствующего минимальному времени распространения. Необходимо детально знать n как функцию координат для вычисления выражения (1). В большинстве случаев это является проблемой, потому что коэффициент преломления зависит от погодных условий и рельефа подстилающей поверхности. Если среднее значение N оценивается по погодным условиям для некоторой пространственной точки и среднее значение отклонений меньше, чем ΔN , тогда используется выражение (1) для определения флуктуации времени распространения для радиоканала длиной L :

$$\Delta \tau_d = \frac{\Delta N \cdot L}{c_0}. \quad (2)$$

Следовательно, $\frac{\Delta \tau_d}{\tau_d} = \Delta N$, где τ_d – время

для области свободного распространения.

Экспериментальная оценка разницы отклонений коэффициента преломления для приповерхностных радиоканалов в разных пространственных точках представлена в [9]. Измеряя температуру, атмосферное давление и влажность воздуха в одно время, средняя квадратичная разница ко-

эффициентов преломления $\sigma_{\Delta N} = \sqrt{\Delta N^2}$ для пространственных точек протяженностью 103 км будет равна от 2 до 8,5. Экспериментальные измерения были сделаны для городов Кемерово и Томск. Для случая, когда $\Delta \sigma_N = 10$, $L = 40$ км, по-

грешность флуктуации времени распространения составит $\sigma_{\tau_d} = 1,5$ нс. Таким образом, используя среднее значение можно определить зависимость времени распространения сигнала от отклонения скорости радиоволны.

2. Расчет погрешности синхронизации приемной аппаратуры наземных пунктов и экспериментальные результаты погрешности синхронизации разнесенных пунктов

Корреляционный приемник имеет m -последовательность такую же, как и передатчик. Для формирования сигнала временной ошибки между входным и опорным сигналами опорная m -последовательность имеет сдвиг во времени $T_1/2$ или минус $T_1/2$ для каждого периода последовательности, где T_1 – длительность символа, составляющего последовательность; τ – дискрета временного сдвига, управляющая электронным коммутатором. Блок-схема корреляционного приемника в упрощенном виде изображена на рис. 1.

Пусть

$$x(t) = a \cdot u_0(t) + u_s(t) + n(t) = \operatorname{Re} x(t) \cdot e^{j\omega_0 t},$$

где $a \cdot u_0(t)$ – полезный сигнал; $u_s(t)$ – сигнал, рассеянный рельефом; $n(t)$ – собственный шум приемника.

Комплексный вид полезного сигнала:

$$\begin{aligned} a \cdot u_0(t) &= a \cdot \operatorname{Re} A(t) \cdot e^{j\varphi(t)} \cdot e^{j\omega_0 t} = \\ &= a \cdot \operatorname{Re} U(t) \cdot e^{j\omega_0 t}, \end{aligned} \quad (3)$$

где уравнение для полезной интегральной амплитуды сигнала:

$$U(t) = \sum_{i=1}^N U_{0i} (t - (i-1) \cdot T_1)^*,$$

$$U_{0i} = \pm 1.$$

Суммарная корреляция входного сигнала и опорной m -последовательности выполняется множителем функции, узкополосным фильтром

и амплитудным детектором. Выражение для расчета величины напряжения выходного сигнала на выходе схемы вычитания имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} u_{discr}(\tau) &= \int_0^T x(t - \tau) \cdot U_0(t - \frac{T_1}{2}) dt - \\ &- \int_0^T x(t + T - \tau) \cdot U_0(t + T + \frac{T_1}{2}) dt. \end{aligned} \quad (4)$$

Так как m -последовательность периодическая, можно выполнить преобразование (4):

$$\begin{aligned} u_{discr}(\tau) &= \int_0^T x(t - \tau) \cdot U_0(t + \frac{T_1}{2}) dt - \\ &- \int_0^T x(t + T - \tau) \cdot U_0(t + \frac{T_1}{2}) dt. \end{aligned} \quad (5)$$

При условии отсутствия рассеяния сигнала синхронизации подстилающей поверхностью и пренебрежительно малого уровня собственных шумов приемной аппаратуры:

$$\begin{aligned} u_{discr}(\tau) &= a_0 \cdot \int_0^T U_0(t - \tau) \cdot U_0(t - \frac{T_1}{2}) dt - \\ &- a_0 \cdot \int_0^T U_0(t - \tau) \cdot U_0(t + \frac{T_1}{2}) dt + \\ &+ a_1 \cdot \int_0^T U_0(t - \tau_1 - \tau) \cdot U_0(t - \frac{T_1}{2}) dt - \\ &- a_1 \cdot \int_0^T U_0(t - \tau_1 - \tau) \cdot U_0(t + \frac{T_1}{2}) dt = \\ &= a_0 \cdot \left[K(\tau - \frac{T_1}{2}) - K(\tau + \frac{T_1}{2}) \right] + \\ &+ a_1 \cdot \left[K(\tau + \tau_1 - \frac{T_1}{2}) - K(\tau + \tau_1 + \frac{T_1}{2}) \right], \end{aligned} \quad (6)$$

где $K(\tau)$ – автокорреляционная функция m -последовательности.

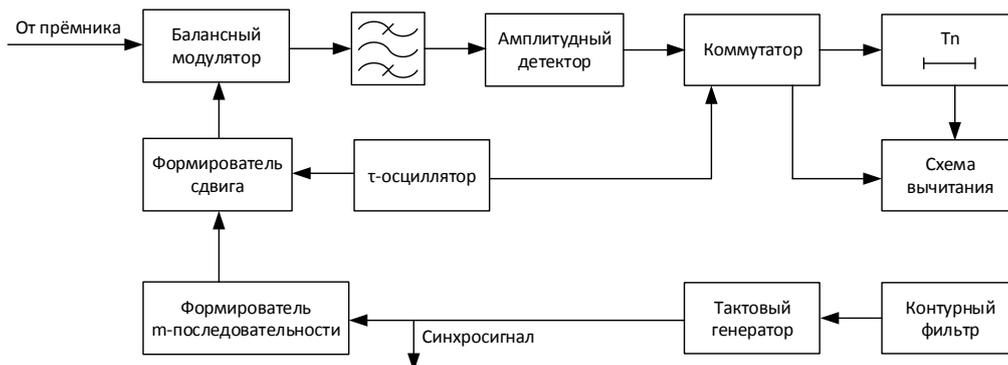


Рис. 1. Блок-схема корреляционного приемника

На рис. 2 представлена корреляционная функция и характеристика временного дискриминатора. Характеристика линейная если $|\tau| < \frac{T_1}{2}$, тогда:

$$u_{discr}(\tau) = \frac{2a_0\tau}{T_1}. \quad (7)$$

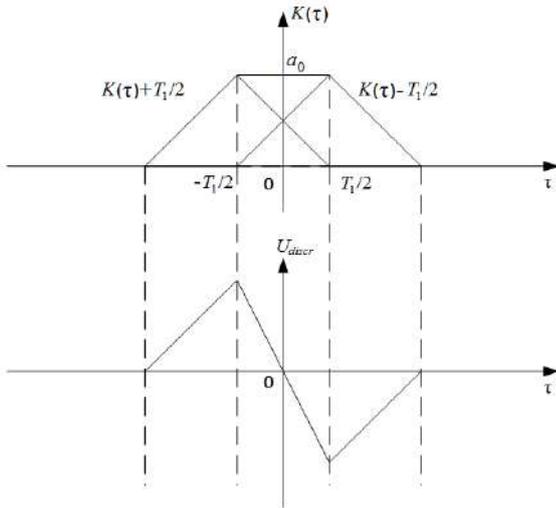


Рис. 2. Характеристика временного дискриминатора

Максимальное значение напряжения на выходе временного дискриминатора соответствует корреляции во времени входа и опорной m -последовательности в условиях без помех. Если отсутствуют собственные шумы приемника, но присутствует рассеяние сигнала из-за рельефа, тогда используется уравнение (5):

$$\begin{aligned} u_{discr}(\tau) = & a_0 \cdot \int_0^T U_0(t-\tau) \cdot U_0(t-\frac{T_1}{2}) dt - \\ & - a_0 \cdot \int_0^T U_0(t+T-\tau) \cdot U_0(t+\frac{T_1}{2}) dt + \\ & + \int_0^T U_0(t-\tau) \cdot U_0(t-\frac{T_1}{2}) dt - \\ & - \int_0^T U_0(t+T-\tau) \cdot U_0(t+\frac{T_1}{2}) dt. \end{aligned} \quad (8)$$

Сбой счета времени зависит от статистических данных рассеянного сигнала и динамических характеристик следящей системы.

В общем виде, рассеянный сигнал представляет собой сумму отраженных лучей [3; 4; 11]:

$$u_s(t) = \sum_{i=1}^N a_i u_0(t-\tau_i), \quad (9)$$

где a_i – коэффициент амплитуды, τ_i – разница во времени распространения полезного и отраженного сигналов.

Форма сигнала $u_s(t)$ зависит от пути распространения сигнала, высоты антенн, диаграммы направленности антенн ведущего и периферийных (ведомых) пунктов. Согласно условиям сумма отраженных сигналов (9) может варьироваться от нуля до значения верхней границы. Как правило, сигнал $u_s(t)$ является стационарным случайным процессом.

Для операционного анализа следящей системы наиболее интересными являются отраженные сигналы с задержками относительно прямого меньшими, чем ширина дискриминационной характеристики схемы слежения за задержкой. Допустим только отраженный сигнал с коэффициентом амплитуды a_1 , временем задержки $\tau_1 < T_1$ и фазовым сдвигом несущей частоты $\varphi_1 = 0$.

Следовательно, принимая во внимание выражение (7):

$$u_{discr}(\tau) = \frac{2a_0}{T_1} \tau + \frac{2a_1}{T_1} (\tau + \tau_1), \quad (10)$$

$$|\tau| < \frac{T_1}{2}, \quad |\tau - \tau_1| < \frac{T_1}{2}.$$

Пусть $\frac{a_1}{a_0} = K_1$, тогда, исходя из выраже-

ния (10), ошибка схемы слежения в установившемся режиме, вызванная отраженным сигналом, описывается следующим выражением:

$$\tau = -\frac{\tau_1 \cdot K_1}{1 + K_1}, \quad |\tau| < \frac{T_1}{2}. \quad (11)$$

Знак « \leftrightarrow » в правой части уравнения означает задержку опорной последовательности относительно входного полезного сигнала.

Если количество отраженных сигналов N , тогда выражение (11) преобразуется:

$$\tau = -\frac{\sum_{i=1}^N \tau_i \cdot K_i}{1 + \sum_{i=1}^N K_i}, \quad \text{при } |\tau| < \frac{T_1}{2}. \quad (12)$$

Таким образом, точность синхронизации зависит от разности фаз прямого и отраженного сигналов. Каждый входной сигнал формирует гармонические колебания на входе детектора, амплитуды гармонических колебаний пропорциональны функции взаимной корреляции комплексной огибающей входного сигнала и опорной m -последовательности (рис. 1). Пусть на входе приемника будет три сигнала: прямой сигнал и два отраженных сигнала. Функция взаимной корреляции общего входного сигнала и основной последовательности вычисляется как:

$$K_{\Sigma}(\tau) = \sqrt{(K_0(\tau) + K_1(\tau) \cos \varphi_1 + K_2(\tau) \cos \varphi_2)^2 + (K_1(\tau) \sin \varphi_1 + K_2(\tau) \sin \varphi_2)^2},$$

где $K_1(\tau)$ – функция взаимной корреляции опорного и прямого сигналов; $K_2(\tau)$ – функция взаимной корреляции опорного сигнала и второго отражения сигнала; τ_1 – разница распространения радиоволны первого отражения сигнала и прямого сигнала; τ_2 – разница распространения радиоволны второго отражения сигнала и прямого сигнала; φ_1 – фаза первого отражения сигнала; φ_2 – фаза второго отражения сигнала.

Для формирования m -последовательности длиной в 1023 знака необходимо смоделировать 10-битный регистр сдвига с обратными связями. Каждый знак m -последовательности состоит из 20 дискретных значений. Число дискретных значений определяет точность моделирования $100/20 = 5$ нс. Входной сигнал состоит из прямого сигнала и только первого отражения. В режиме поиска следящей системы синхронизации определяется максимум корреляционной функции и фиксируется время максимума корреляционной функции. В режиме автосопровождения сравниваются

значения $K_{\Sigma}(\tau - 50)$ и $K_{\Sigma}(\tau + 50)$. В зависимости от результата сравнения выполняется увеличение на 1 или уменьшение на 1 значения τ до тех пор, пока $K_{\Sigma}(\tau - 50)$ не станет равно $K_{\Sigma}(\tau)$. Результаты моделирования для отраженных сигналов с различными параметрами показаны на рис. 3 и 4.

106

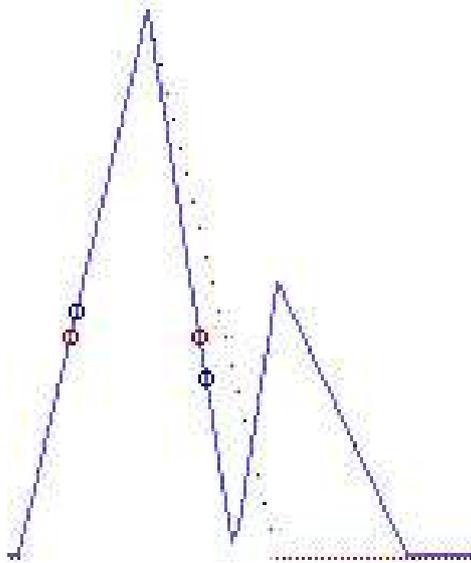


Рис. 3. Функция взаимной корреляции входного и опорного сигналов $k_1 = a_1/a_0$, $a_2 = 0$, $\tau_2 = 100$ нс, $\varphi_1 = \pi$, $\Delta t = 10$ нс

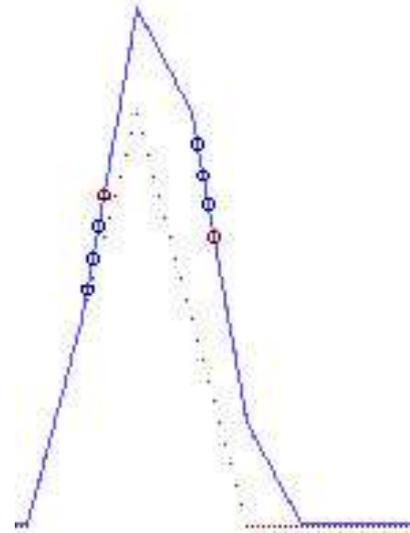


Рис. 4. Функция взаимной корреляции входного и опорного сигналов $k_1 = a_1/a_0$, $a_2 = 0$, $\tau_2 = 50$ нс, $\varphi_1 = 0$, $\Delta t = 17$ нс

Пунктирной линией отображена функция взаимной корреляции опорного сигнала и входного сигнала в условиях отсутствия рассеяния синхронизирующего сигнала. Точки на графике обозначают работу следящей системы в режиме автосопровождения. Погрешность синхронизации приемной аппаратуры наземных пунктов спутниковой связи по результатам моделирования составила менее 5 нс. По результатам экспериментальных испытаний двух наземных пунктов максимальная погрешность синхронизации составила до 60 нс. Результаты измеренных значений задержки синхронизирующего сигнала и погрешность системы синхронизации представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты экспериментальных испытаний

Номер радиоканала	Измеренная задержка, нс	Средне-квадратичное значение, нс	Реальная задержка, нс	Данные системы синхронизации, м	GPS данные, м	Измеренная ошибка, м
1	54710,02	0,80	54411,48	8167,13	8154,38	4,14
2	72649,50	2,85	72330,76	10853,96	10839,55	5,81
3	55128,19	1,53	54662,89	8204,82	8191,09	5,13
4	55217,42	1,68	54752,12	8218,20	8187,03	11,57
5	55222,40	0,49	54724,04	8213,99	8187,03	18,36

6	55222,10	0,54	54723,67	8213,94	8187,03	18,30
7	55226,30	2,03	54727,9	8214,58	8187,03	18,94
8	55232,09	3,70	54733,69	8215,44	8187,03	19,81
9	55239,52	1,98	54741,12	8216,55	8187,03	20,92
10	55239,53	1,10	54741,13	8216,55	8187,03	20,92
11	55236,57	0,96	54738,17	8216,11	8187,03	20,48
12	55236,52	0,89	54738,12	8216,10	8187,03	20,47

В шестом столбце представлен массив данных, полученных ГНСС-приемником Ashtech с паспортной точностью менее 1 м. В седьмом столбце представлены разности расстояний, которые были вычислены с помощью времени распространения радиоволн и данных GPS. Временные зависимости задержек, осредненных на минутном интервале распространения радиоволн для двух разных радиоканалов, показаны на рис. 5 и 6.

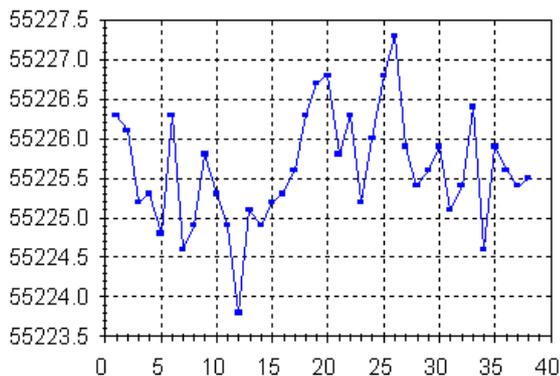


Рис. 5. Временная задержка распространения радиоволны для радиоканала 7

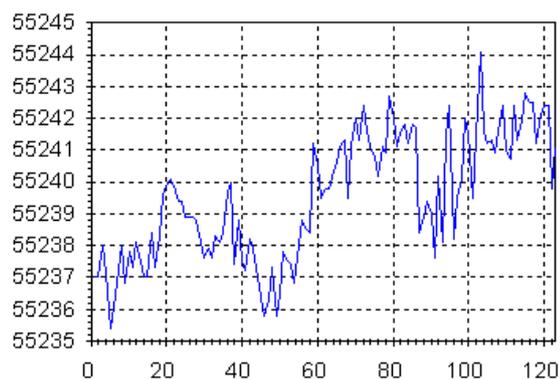


Рис. 6. Временная задержка распространения радиоволны для радиоканала 8

Заключение

Таким образом, по результатам экспериментальных испытаний взаимной синхронизации разнесенных пунктов можно сделать следующие выводы:

1. Временная ошибка для двух наземных пунктов систем спутниковой связи состоит из:
 - динамических отклонений (до 3,7 нс);
 - медленных отклонений (до 8 нс);
 - систематической погрешности синхронизации (до 60 нс).

2. Временная погрешность составляет порядка 60 нс поверенного оборудования без дополнительной коррекции в условиях измеренных и допустимых сбоях оборудования.

3. Для минимизации временной ошибки необходимо делать дополнительную коррекцию. Значение дополнительной поправки может быть определено, например, с помощью сравнения времени распространения радиоволны от одного наземного пункта систем спутниковой связи к другому и данных GPS. В данном случае временная ошибка составила менее 8,8 нс, включая медленноменяющуюся и динамическую составляющие.

Благодарности

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 связности труднодоступных, северных и Арктических территорий Российской Федерации», осуществляемого при участии Сибирского федерального университета (соглашение № 075-11-2019-078 от 13.12.2019).

Список литературы

[1] Харисов В. Н. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. В. Н. Харисова [и др.]. М. : Радиотехника, 2010. 800 с.
 [2] Gladyshev A. B., Dmitriev D. D., Tyapkin V. N., Ratuschnyay V. N. Development of a device for monitoring and tuning radio-technical parameters of a satellite communications Earth station // Journal of Physics. 2020. vol. 1661. issue 1.

- [3] Ширман Я. Д., Манжос В. Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М. : Радио и связь, 1981. 416 с.
- [4] Фарина А., Студер Ф. Цифровая обработка радиолокационной информации. М. : Радио и связь, 1993. 320 с.
- [5] Гарин Е. Н., Копылов В. А., Ратушняк В. Н., Лютиков И. В. Современное развитие ГНСС ГЛОНАСС и GPS // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2018. Т. 11. № 3. С. 313–317.
- [6] Тяпкин В. Н., Фатеев Ю. Л., Дмитриев Д. Д., Гарин Е. Н., Ратушняк В. Н. Создание помехозащищенных навигационных приемников, способных измерять пространственную ориентацию объектов // Успехи современной радиоэлектроники. 2014. № 5. С. 61–65.
- [7] Аргунов А. Д., Малюков С. Н., Ляшко В. Н., Бабайкин Б. Ф. Система передачи информации, использующая навигационный сигнал ИФРНС // Сб. трудов НТК «Планирование глобальной радионавигации». НТЦ «Интернавигация». 1997.
- [8] Тяпкин В. Н., Гарин Е. Н. Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС : монография. Красноярск : Сиб. федер. университет, 2012. 260 с.
- [9] Winkler G. M. Path Delay, Its Variations, and Some Implications for the Field Use of Precise Frequency Division // Proceeding of IEEE. 1972. vol. 60. no. 5.
- [10] Киселев О. Н. Статистика неоднородностей коэффициента преломления в приземном слое атмосферы // 9 Всесоюзная конференция по распространению радиоволн. Тезисы докладов. Ч. 1. Харьков. 1969.
- [11] Turin G. L. Introduction to Spread – Spectrum Antimultipath Techniques and Their Application to Urban Digital Radio // Proceedings of IEEE. 1980. vol. 68. no. 3. p. 30.

ESTIMATION OF THE SYNCHRONIZATION ERROR FOR SPACED-APART GROUND POINTS OF SATELLITE COMMUNICATION

R. B. Kovalev¹, V. V. Kornienko², V. N. Ratushnik³

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

² Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
Tomsk, Russian Federation

³ Siberian Federal University,
Krasnoyarsk, Russian Federation

A significant number of patents and publications in the open press show the intensity of the ongoing research to create new methods of synchronization and specialized ground-based equipment for frequency-time synchronization. The article considers the implementation of an autonomous synchronization system between ground-based satellite communication points, which is used in conditions of unfavorable reception or absence of signals from global navigation satellite systems. The paper presents studies on the assessment of the error of time synchronization of geographically separated ground points of satellite communications. The basics of constructing the receiving equipment of a radio engineering system are considered and the mutual correlation of the reference signal of the receiving equipment and the received input synchronization signal is calculated. The results of field tests of mutual synchronization equipment are presented, where the potential synchronization accuracy of equipment at ground objects with previously unknown coordinates was determined, while the synchronization equipment provided measurement of the signal propagation time from one ground object to another with the formation of universal time scales on points. The method of mutual synchronization of linked points is carried out by the duplex method at a frequency of 1065 MHz (request) and 625 MHz (response) by phase-code-manipulated signals with a base equal to 1023 and a duration of 0,1 μs.

Keywords: ground station, time scale, synchronization system, highly stable reference frequency, time scale error.

References

- [1] Kharisov V. N., Perov A. I., Boldin V. A. *GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya* [GLONASS. Construction principles and operation]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2010. 800 p. (In Russian)
- [2] Gladyshev A. B., Dmitriev D. D., Tyapkin V. N., Ratuschnyay V. N. Development of a device for monitoring and tuning radio-technical parameters of a satellite communications Earth station // *Journal of Physics*, 2020, vol. 1661, issue 1.
- [3] Shirman Ya. D., Manzhos V. N. *Teoriya i tekhnika obrabotki radiolokacionnoj informacii na fone pomekh* [Theory and technique of processing radar information against the background of interference]. Moscow, Radio and communication, 1981, 416 p. (In Russian)
- [4] Farina A., Studer F. *Cifrovaya obrabotka radiolokacionnoj informacii* [Digital processing of radar information]. Moscow, Radio and communication, 1993, 320 p. (In Russian)
- [5] Garin E. N., Kopylov V. A., Ratuschnyay V. N., Lyutikov I. V. *Sovremennoe razvitie GNSS GLONASS i GPS* [Modern development of GNSS GLONASS and GPS] // *Journal of the Siberian Federal University. Series: Engineering and technology*, 2018, vol. 11, no. 3, pp. 313–317. (In Russian)
- [6] Tyapkin V. N., Fateev Yu. L., Dmitriev D. D., Garin E. N., Ratuschnyay V. N. *Sozdanie pomexhozashchishchennykh navigacionnykh priemnikov, sposobnykh izmeryat' prostranstvennyuyu orientaciyu ob"ektov* [Creation of noise-immune navigation receivers capable of measuring the spatial orientation of objects] // *Achievements of Modern Radioelectronics*, 2014, no. 5, pp. 61–65. (In Russian)
- [7] Argunov A. D., Malyukov S. N., Lyashko V. N., Babaikin B. F. *Sistema peredachi informacii, ispol'zuyushchaya navigacionnyy signal IFRNS* [Information transmission system using the IFRNS navigation signal] // *Proceedings «Global Radio Navigation Planning»*, Moscow, 1997. (In Russian)
- [8] Tyapkin V. N., Garin E. N. *Metody opredeleniya navigacionnykh parametrov podvizhnykh sredstv s ispol'zovaniem sputnikovoj radionavigacionnoj sistemy GLONASS* [Methods for determining the navigation parameters of mobile facilities using the GLONASS satellite radio navigation system]. Krasnoyarsk, SibFU, 2012, 260 p. (In Russian)
- [9] Winkler G. M. Path Delay, Its Variations, and Some Implications for the Field Use of Precise Frequency Division // *Proceeding of IEEE*, 1972, vol. 60, no. 5.
- [10] Kiselev O. N. *Statistika neodnorodnostej koefficienta prelomleniya v prizemnom sloe atmosfery* [Statistics of inhomogeneities of the refractive index in the surface layer of the atmosphere] // 9 All-Union conference on the propagation of radio waves. Abstracts of reports, Part 1, Kharkov, 1969. (In Russian)
- [11] Turin G. L. Introduction to Spread – Spectrum Antimultipath Techniques and Their Application to Urban Digital Radio // *Proceedings of IEEE*, 1980, vol. 68, no. 3, p. 30.

Сведения об авторах

Ковалев Роман Борисович – начальник группы размещения измерительных наземных станций ГЛОНАСС АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». Область научных интересов: синхронизация наземных станций по сигналам ГНСС.

Корниенко Владимир Владимирович – инженер измерительной лаборатории Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

Ратушняк Василий Николаевич – кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры АСУ Военного учебного центра при Сибирском федеральном университете. Область научных интересов: радионавигация по сигналам ГНСС и наземных РНС, наземная радиолокация.

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР В ОТКРЫТОМ КОСМОСЕ

**В. В. Блинов¹, В. М. Владимиров², С. Н. Кулинич²,
А. И. Никифоров¹, Д. Н. Придачин¹, Д. О. Пчеляков¹,
О. П. Пчеляков¹ ✉, Л. В. Соколов¹, Д. В. Яроцкий¹**

¹ Институт физики полупроводников имени А. В. Ржанова СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

² ООО НПФ «Электрон»,

г. Красноярск, Российская Федерация

Настоящая статья посвящена краткому описанию особенностей оборудования, разработанного в Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова для проведения экспериментов по выращиванию полупроводниковых гетероструктур из молекулярных пучков в открытом космосе в условиях орбитального полета международной космической станции. Описаны конструктивные особенности технологической оснастки и систем управления, предназначенных для реализации процесса эпитаксии многослойных кристаллических пленок. Отработка процессов эпитаксии полупроводниковых пленок в условиях космического пространства позволит выращивать сложные полупроводниковые структуры с резкими границами, служащие основой для создания солнечных элементов, а также приборов современной СВЧ, опто- и микроэлектроники. Каскадные фотоэлектрические преобразователи на основе таких многослойных гетероструктур из полупроводниковых соединений АЗВ5 обладают высокой эффективностью и радиационной стойкостью и, поэтому, наиболее широко применяются для изготовления космических солнечных батарей. Высокая эффективность таких батарей обусловлена широким спектральным диапазоном, в котором эффективно поглощается солнечное излучение и используется в фотоэлектрическом преобразовании.

Ключевые слова: космическое материаловедение, молекулярно-лучевая эпитаксия, защитный экран, орбитальный полет, сверхвысокий вакуум.

Введение

Оборудование, описанное в данном разделе, предназначено для проведения технологического процесса молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) по выращиванию пленочных полупроводниковых структур в условиях международной космической станции (МКС) за защитным молекулярным экраном, обеспечивающим защиту рабочей зоны МЛЭ от набегающего потока и прямых потоков собственной внешней атмосферы, исходящих с поверхности МКС. Внутри станции размещается блок управления и сбора информации, который выполняет функцию управления работой всей аппаратуры, сбора полученной информации и связи с информационной системой МКС.

Идея использования эффекта молекулярного экрана для получения сверхвысокого вакуума в космосе на низких орбитах принадлежит американским ученым. Первым эту идею в 1970 году выдвинул Рональд Костоф [1]. В 1976 году Л. Мелфи с соавторами провел теоретический анализ состояния газовой среды вокруг летящего в пространстве полусферического экрана и сформулировал концепцию орбитальной лаборатории со сверхразреженной средой. Практическая апробация этих идей была проведена в коллективе сотрудников Университета в Хьюстоне под руководством А. Игнатьева [2]. Эта работа проводилась при поддержке NASA. Расчеты и первые эксперименты в аэродинамической трубе показали, что если на высоте 200–400 км с первой космической скоростью будет двигаться экран – полированный диск из нержавеющей стали – то в его кильватере образуется конусный след, практически лишенный вещества. Все давление за экраном будет опре-

✉ pchome@mail.ru

© Ассоциация «ТП «НИСС», 2021

деляться атомами гелия и водорода, источником которых является Солнце, а также веществом, испаряющимся с поверхности самого экрана. Для сравнения отметим, что в наземных сверхвысоковакуумных технологических установках с криогенными насосами достигается предельное разрежение в сотни и тысячи раз хуже, чем было практически получено в первых американских космических экспериментах с молекулярным экраном [2]. На высотах орбитального полета при поперечном обтекании защитного экрана в аэродинамическом следе за ним существует стабильная естественная область глубокого вакуума. В этой области «космического» вакуума достигаются уровни разрежения порядка 10^{-14} мм рт. ст. и ниже при почти полном отсутствии кислорода и углеродсодержащих компонент. Если с рабочей («теневой») поверхности защитного экрана путем прогрева предварительно удалены сорбированные примеси, то скорости собственного газовыделения в зону следа также соответствуют давлению ниже 10^{-14} мм рт. ст. Такой уровень газовыделения характерен для обезгаженных металлов, применяемых в сверхвысоковакуумной технике. В вакууме, образующемся за экраном, в процессе экспериментов производится термическое испарение As и Ga из отдельных молекулярных источников. Молекулы As и Ga, достигая поверхности нагретой подложки GaAs, соединяются с образованием соединения GaAs. Молекулы GaAs достраивают кристаллическую решетку подложки, формируя эпитаксиальную пленку GaAs. Ключевую роль в формировании совершенной пленки играет чистота как молекулярных пучков As и Ga, так и чистота поверхности подложки. Следовательно, процесс должен происходить в условиях как можно более высокого вакуума. Вблизи поверхности МКС атмосфера имеет довольно высокое фоновое давление ($\sim 10^{-3}$ Па) поэтому в эксперименте используется защитный экран, ориентированный так, чтобы защищать зону эпитаксии как от потоков загрязнений, десорбирующихся с поверхности космического аппарата, так и от набегающего потока внешней среды [3–10].

Краткое описание оборудования

Защитный экран имеет открывающуюся крышку, которая вакуумно плотно закрыта при наземной отработке и в процессе доставки космической научной аппаратуры молекулярно-лучевой эпитаксии (КНА МЛЭ) на орбиту. Перед началом эксперимента крышка открывается и газообразные компоненты, выделившиеся из деталей нагретой арматуры, свободно истекают в космическое пространство [8–10].

После того, как пленка GaAs выращена, манипулятор передает подложку с выращенной

пленкой в кассету (рис. 1 и 2), берет следующую подложку и цикл повторяется. После обработки всех шести подложек температура источников и нагревателя подложек понижается, кассета приводится в крайнее положение, при котором возможно произвести ее замену и закрывается крышка камеры. В случае если происходит отказ одного из источников молекулярного пучка (потеря сигнала термопары, разрыв цепи нагревателя, сбой в работе заслонки), эксперимент может быть продолжен с использованием резервного источника.

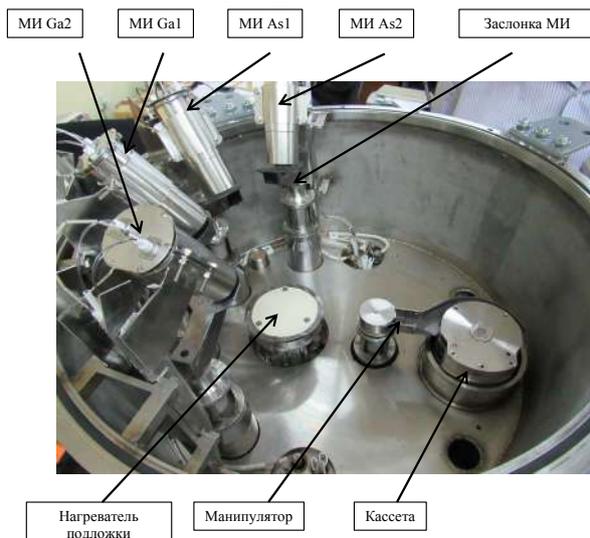


Рис. 1. Расположение элементов аппаратуры МЛЭ (МИ – молекулярный источник)

Привод кассеты (рис. 3) служит для перемещения кассеты и обеспечивает позиционирование очередной подложки в положение захвата манипулятором. Привод кассеты содержит электромеханический механизм на основе шагового двигателя, который управляется токовыми импульсами, поступающими от электронного блока.

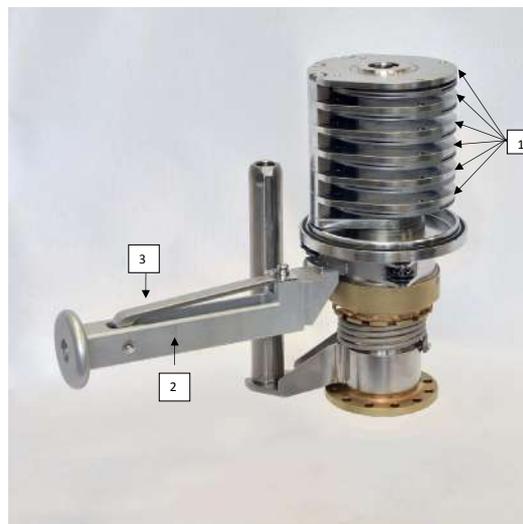


Рис. 2. Кассета: 1 – молибденовые носители с подложками, 2 – рукоятка прижима, 3 – фиксирующий рычаг рукоятки прижима

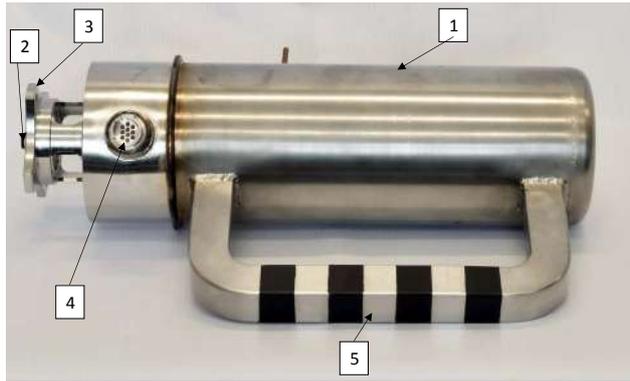


Рис. 3. Привод кассеты: 1 – корпус привода, 2 – шток, 3 – присоединительный фланец, 4 – электросоединитель, 5 – ручка

БУСИ производится ИУС МЛМ автоматически не реже 1 раза до 2 Мбайт в сутки для сброса на Землю с использованием имеющегося бортового радиокomплекса. Все научные данные записываются на сменных накопителях информации.



Рис. 4. БУСИ – фронтальный вид

Импульсы тока поступают по кабелю от электросоединителя (4). Корпус привода кассеты (1) изготовлен из нержавеющей стали, заполнен азотом и герметично отпаян. Привод присоединяется к кассете фланцем (3). Поступательное движение привода к кассете передается штоком (2). После окончания эксперимента кассета отсоединяется от привода и доставляется на Землю, а привод утилизируется. Для обеспечения манипуляций с кассетой с приводом в кожухе привода кассеты оснащен ручкой (5), приспособленной для работы рукой в перчатке скафандра.



Рис. 5. Внешний вид БДК без радиатора и защитного кожуха

Как уже было отмечено, электронная часть аппаратуры состоит из блока управления и сбора информации (БУСИ), который размещается внутри герметичного отсека МКС (рис. 4) и блока драйверов и контроллеров (БДК), который размещается на наружной поверхности МКС (рис. 5). БУСИ обеспечивает:

- управление работой КНА МЛЭ по заданной программе;
- организацию командно-информационного обмена с информационной управляющей системой многоцелевого лабораторного модуля (ИУС МЛМ) по интерфейсу Ethernet серии IEEE802.3-2012 для физического и логического уровней обмена со скоростью передачи 10/100 Мбит/с по медножильным трактам (10BaseT/100BaseTx);
- выдачу собственной телеметрии;
- индикацию состояния оборудования МЛЭ в ходе эксперимента.

Командно-информационный обмен БУСИ и ИУС МЛМ состоит из следующих видов обмена:

- получение команд управления в БУСИ;
- передача служебных данных от БУСИ.

Объем команд управления составляет не более 1 Кбайт/сутки и поступает из Центра управления полетами во время сеансов связи. Для синхронизации времени используется протокол NTP (Network Time Protocol RFC 1305). Время представления обеспечивается с точностью 1 с. Считывание накопленной научной информации

БДК обеспечивает электрические соединения между входящими в него блоками и их надлежащий тепловой режим при помощи радиатора и термостатирующих устройств.

Блок питания обеспечивает:

- электропитание КНА МЛЭ;
- подачу напряжения на нагреватели, входящие в состав КНА МЛЭ, и регулирование их температуры.

Блок управления обеспечивает:

- преобразование сигналов термопар, входящих в состав КНА МЛЭ, и сигнала от аппаратуры вакуумного контроля в цифровую форму и передачу полученных данных в БУСИ;
- прием сигналов с датчиков положения, входящих в состав КНА МЛЭ, и их передачу в БУСИ;
- выдачу управляющих воздействий на электроприводы, входящих в состав КНА МЛЭ.

Аппаратура вакуумного контроля обеспечивает измерение остаточного давления вблизи зоны реализации процессов МЛЭ.

Заключение

После цикла материаловедческих исследований в наземных условиях с использованием описанного в данной статье оборудования в программе полетных экспериментов предполагается реализовать преимущества открытого космоса. Это глубокий вакуум и почти неограниченная скорость откачки компонент рабочего молекулярного пучка, создающие уникальную возможность для сверхбыстрой смены химического состава газовой среды в зоне роста на поверхности подложки. Такие условия позволят выращивать многослойные монокристаллические материалы с особо резкими границами между слоями, обладающими высокой однородностью по площади и любыми профилями контролируемого легирования по толщине. Толщина слоев в подобных материалах может быть менее 100 нм. Важную роль в их космическом синтезе сыграет отсутствие стенок рабочей камеры и возможность существенного пространственного удаления элементов технологической оснастки от зоны роста наногетероструктур. Кроме того, при синтезе наногетероструктур в космосе в качестве исходных материалов могут использоваться токсичные

летучие жидкости и газы (например, гидриды и металлорганические соединения) без угрозы загрязнения окружающей среды. Эти соединения быстро рассеиваются до безопасных концентраций и легко разлагаются на безопасные компоненты под действием солнечного ионизирующего излучения. Особенно важно, что в пленках, выращенных в космическом вакууме, должны практически отсутствовать углеродо- и кислородосодержащие компоненты – самые вредные примеси в полупроводниках, ухудшающие их оптические и электронные свойства. Таким образом будет реализована новая технология получения альтернативного подложечного материала и многослойных гетероструктур для нужд опто-, микро- и наноэлектроники.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Программы «Экран» фундаментальных космических исследований РАН, контрактов с АО «РКК «Энергия» им. С. П. Королёва» и АО «ЦНИИмаш», в сотрудничестве с АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва» и ООО НПФ «Электрон».

Список литературы

- [1] Kostoff R. N. Stimulating Innovation. International Handbook of Innovation. Elsevier Social and Behavioral Sciences, Oxford, UK. 2003. pp. 388–400.
- [2] Ignatiev A. The wake shield facility and space-based thin film science and technology // Earth Space Review. 1995. vol. 2. no. 2. pp. 10–17.
- [3] Pchelyakov O. P., Sokolov L. V., Nikiforov A. I., Berzhaty V. I., Zvorykin L. L., Ivanov A. I., Nikitsky V. P., Antropov V. Yu., Biriukov V. M., Markov E. V., Djakov Yu. N. Epitaxy of compound semiconductor from molecular beams in space vacuum behind molecular shield // Proc. of Joint X Europ. and VI Russian symp. on Phys. Sci. in Microgravity. 1997. vol. II. pp. 144–149.
- [4] Pchelyakov O. P., Blinov V. V., Nikiforov A. I., Sokolov L. V., Zvorykin L. L., Ivanov A. I., Teslenko V. V., Churilo I. V., Zagrebel'nyi A. A. Semiconductor Vacuum Technologies in Space: Hystory, State and Prospects. Poverhnost' (Rus). 2004. vol. 6. pp. 69–76.
- [5] Скорodelов В. А., Пчеляков О. П. Фундаментальная наука открывает путь к промышленному освоению космоса // Интеграл. 2009. № 3. С. 4–7.
- [6] Pridachin D., Pchelyakov O., Nikiforov A., Sokolov L., Preobrazhenskii V., Blinov V. Some design and applying aspects of Molecular Beam Epitaxy (MBE) machine Main Units in Ultra-Vacuum of Space. Proc. of European Planetary Science Congress. Riga, Latvia. 2017.
- [7] Ignatiev A., Freundlich A., Pchelyakov O., Nikiforov A., Sokolov L., Pridachin D., Blinov V. Molecular Beam Epitaxy in the Ultravacuum of Space: Present and Near Future // From Research to Mass Production. 2018. pp. 741–749. doi: 10.1016/B978-0-12-812136-8.00035-9
- [8] Пчеляков О. П., Блинов В. В., Никифоров А. И., Соколов Л. В., Зворыкин Л. Л. Создание высоковакуумной зоны в аэродинамическом следе за защитным экраном в условиях орбитального полета на высотах $H = 250 - 400$ км // Космические аппараты и технологии. 2018. Т. 2. № 3. С. 119–124. doi: 10.26732/2618-7957-2018-3-119-124
- [9] Блинов В. В., Машанов В. И., Никифоров А. И., Придачин Д. Н., Пчеляков Д. О., Пчеляков О. П., Соколов Л. В., Титов В. П. Установка для молекулярно-лучевой эпитаксии «Катунь-100» // Космические аппараты и технологии. 2018. Т. 2. № 3. С. 170–174. doi: 10.26732/2618-7957-2018-3-170-174
- [10] Пчеляков О. П. Полупроводниковые вакуумные технологии в космическом пространстве: история, состояние, перспективы // Космические аппараты и технологии. 2018. Т. 2. № 4. С. 229–235. doi: 10.26732/2618-7957-2018-4-229-235

EQUIPMENT FOR GROWING SEMICONDUCTOR HETEROSTRUCTURES IN OUTER SPACE

**V. V. Blinov¹, V. M. Vladimirov², S. N. Kulinich², A. I. Nikiforov¹,
D. N. Pridachin¹, D. O. Pchelyakov¹, O. P. Pchelyakov¹,
L. V. Sokolov¹, D. V. Yarockiy¹**

¹ Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation

² LLC NPF Electron,
Krasnoyarsk, Russian Federation

114

This article describes the features of the equipment developed at the Rzhanov Institute of Semiconductor Physics for conducting experiments on growing semiconductor heterostructures from molecular beams in outer space under the conditions of an orbital flight of the International Space Station. Working out the processes of epitaxy of semiconductor films in outer space will allow us to grow complex semiconductor structures with sharp boundaries, which serve as the basis for the creation of solar cells, as well as devices of modern microwave, opto- and microelectronics. Cascade photovoltaic converters based on such multilayer heterostructures of A3B5 semiconductor compounds have high efficiency and radiation resistance and, therefore, are most widely used for the manufacture of space solar cells. The high efficiency of such batteries is due to the wide spectral range in which solar radiation is effectively absorbed and used in photovoltaic conversion.

Keywords: space materials science, molecular beam epitaxy, molecular screen, orbital flight, ultrahigh vacuum.

References

- [1] Kostoff R. N. Stimulating Innovation. International Handbook of Innovation, Elsevier Social and Behavioral Sciences, Oxford, UK, 2003, pp. 388–400.
- [2] Ignatiev A. The wake shield facility and space-based thin film science and technology // Earth Space Review, 1995, vol. 2, no. 2, pp. 10–17.
- [3] Pchelyakov O. P., Sokolov L. V., Nikiforov A. I., Berzhaty V. I., Zvorykin L. L., Ivanov A. I., Nikitsky V. P., Antropov V. Yu., Biriukov V. M., Markov E. V., Djakov Yu. N. Epitaxy of compound semiconductor from molecular beams in space vacuum behind molecular shield // Proc. of Joint X Europ. and VI Russian symp. on Phys. Sci. in Microgravity, 1997, vol. II, pp. 144–149.
- [4] Pchelyakov O. P., Blinov V. V., Nikiforov A. I., Sokolov L. V., Zvorykin L. L., Ivanov A. I., Teslenko V. V., Churilo I. V., Zagrebel'nyi A. A. Semiconductor Vacuum Technologies in Space: History, State and Prospects. Poverhnost' (Rus), 2004, vol. 6, pp. 69–76.
- [5] Skorodelov V. A., Pchelyakov O. P. *Fundamental'naya nauka otkryvaet put' k promyshlennomu osvoeniyu kosmosa* [Basic science opens the way to industrial space exploration] // Integral, 2009, no. 3, pp. 4–7. (In Russian)
- [6] Pridachin D., Pchelyakov O., Nikiforov A., Sokolov L., Preobrazhenskii V., Blinov V. Some design and applying aspects of Molecular Beam Epitaxy (MBE) machine Main Units in Ultra-Vacuum of Space. Proc. of European Planetary Science Congress, Riga, Latvia, 2017.
- [7] Ignatiev A., Freundlich A., Pchelyakov O., Nikiforov A., Sokolov L., Pridachin D., Blinov V. Molecular Beam Epitaxy in the Ultravacuum of Space: Present and Near Future // From Research to Mass Production, 2018, pp. 741–749. doi: 10.1016/B978-0-12-812136-8.00035-9
- [8] Pchelyakov O. P., Blinov V. V., Nikiforov A. I., Sokolov L. V., Zvorykin L. L. The creation of a high vacuum zone in the aerodynamic wake behind a protective screen in the conditions of orbital flight on the altitude H = 250 – 400 km // Spacecrafts & Technologies, 2018, vol. 2, no. 3, pp. 119–124. doi: 10.26732/2618-7957-2018-3-119-124
- [9] Blinov V. V., Mashanov V. I., Nikiforov A. I., Pridachin D. N., Pchelyakov D. O., Pchelyakov O. P., Sokolov L. V., Titov V. P. Plant for molecular beam epitaxy «Katun-100» // Spacecrafts & Technologies, 2018, vol. 2, no. 3, pp. 170–174. doi: 10.26732/2618-7957-2018-3-170-174
- [10] Pchelyakov O. P. Semiconductor vacuum technologies in space: history, status, prospects // Spacecrafts & Technologies, 2018, vol. 2, no. 4, pp. 229–235. doi: 10.26732/2618-7957-2018-4-229-235

Сведения об авторах

Блинов Виктор Владимирович – ведущий инженер-конструктор, руководитель группы Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН. Область научных интересов: технология и принципы конструирования сверхвысоковакуумного технологического и аналитического оборудования для молекулярной эпитаксии.

Владимиров Валерий Михайлович – доктор технических наук, доцент, заместитель председателя Президиума Красноярского научного центра СО РАН, руководитель отдела радиотехники и электроники при Президиуме Красноярского научного центра СО РАН. Место работы: ООО НПФ «Электрон». Область научных интересов: производство радиолокационной, радионавигационной аппаратуры и радиоаппаратуры дистанционного управления, частотно перестраиваемых фильтров на основе электронного парамагнитного резонанса для станций спутниковой связи.

Кулинич Сергей Николаевич – соруководитель отдела радиотехники и электроники при Президиуме Красноярского научного центра СО РАН. Место работы: ООО НПФ «Электрон». Область научных интересов: производство радиолокационной, радионавигационной аппаратуры и радиоаппаратуры дистанционного управления.

Никифоров Александр Иванович – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН. Область научных интересов: механизмы эпитаксиального роста полупроводниковых гетеросистем с наноструктурами для применения в приборах микро-, нано- и оптоэлектроники, аппараты и технологии для реализации процессов эпитаксии в условиях космического полета.

Придачин Дмитрий Николаевич – ведущий инженер Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН. Область научных интересов: технология и принципы конструирования сверхвысоковакуумного технологического и аналитического оборудования для молекулярной эпитаксии, в том числе в космическом пространстве.

Пчеляков Олег Петрович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН. Лауреат государственной премии. Область научных интересов: физические основы выращивания полупроводниковых наногетероструктур из молекулярных пучков в сверхвысоком вакууме и в условиях космического полета.

Пчеляков Дмитрий Олегович – ведущий инженер-конструктор Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН. Область научных интересов: технология и принципы конструирования сверхвысоковакуумного технологического и аналитического оборудования для молекулярной эпитаксии в космическом пространстве.

Соколов Леонид Валентинович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, руководитель группы Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН. Область научных интересов: эпитаксия кремния и твердых растворов германий–кремний, разработка и изготовление промышленно-ориентированного оборудования для молекулярно-лучевой эпитаксии.

Яроцкий Дмитрий Валерьевич – инженер-конструктор Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН. Область научных интересов: технология и принципы конструирования сверхвысоковакуумного технологического и аналитического оборудования для молекулярной эпитаксии в космическом пространстве.

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, идентификатор ORCID).



ГАГАРИНСКИЕ
ЧТЕНИЯ

Приглашаем студентов,
аспирантов и молодых учёных
в возрасте до 27 лет
к участию в конференции
«Гагаринские чтения»



Направления конференции:

Авиационные системы

Авиационные, ракетные двигатели и энергетические установки

Системы управления, информатика и электроэнергетика

Информационно-телекоммуникационные технологии
авиационных, ракетных и космических систем

Экономика и менеджмент предприятий
аэрокосмического комплекса

Ракетные и космические системы

Робототехника, интеллектуальные системы
и авиационное вооружение

Математические методы в аэрокосмической науке и технике

Новые материалы и производственные технологии в области
авиационной и ракетно-космической техники

Участие в конференции бесплатное.

Конференция проводится
ежегодно в апреле.

Официальный сайт: gagarin.mai.ru



ИВТ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНФОРМАЦИОННЫХ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В Центре сформировался опытный коллектив ученых и инженеров, специализирующийся:

на фундаментальных исследованиях в области информационно-вычислительных технологий;

на создании программно-аппаратных средств в задачах поддержки принятия решений;

на разработке методов, технологий и программных комплексов в задачах автоматизации производств, анализа и проектирования конструкций, сооружений и технических систем.

Важный стратегический партнер ФИЦ ИВТ – АО «ИСС» имени академика М.Ф. Решетнёва»,

совместно с которым проводятся цифровые исследования в области прочности и надежности, осуществляется разработка современных композитных конструкций для спутниковых космических систем.

ФИЦ ИВТ

пр-т Академика Лаврентьева, 6,

630090 Новосибирск, Россия

телефон: +7 (383) 330-61-50

факс: +7 (383) 330-63-42

<http://www.ict.nsc.ru>

*Будущее информационных технологий
начинается с фундаментальной
математики и информатики!*

