

ISSN 2618-7957

КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ И ТЕХНОЛОГИИ

SPACECRAFTS & TECHNOLOGIES



КА «Экспресс-103»

Разработчик и производитель: АО «РЕШЕТНЁВ»

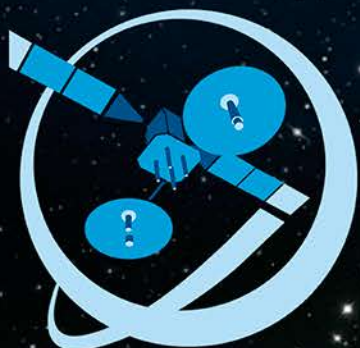


Технологическая платформа

НИСС

Национальная Информационная
Спутниковая Система

**№1 (51)
2025**



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 9

№ 1 (51)

2025

Выходит один раз в три месяца

Красноярский край
Железногорск

Космические аппараты и технологии

Главный редактор
Тестоедов Николай Алексеевич
академик 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, доцент (Красноярск)

Редакционный совет
Алифанов Олег Михайлович
академик РАН, д-р техн. наук, профессор (Москва)
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)

Шайдунов Владимир Викторович
академик РАН, д-р физ.-мат. наук (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)

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)

Надирадзе Андрей Борисович
д-р техн. наук, профессор (Москва)

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)

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)

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 2023 г. – 0,419.

«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.sciup.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, г. Железногорск,
ул. Ленина, 52, корп. 4, ком. 224
e-mail: spacecrafts.technologies@yandex.ru
<http://www.journal-niss.ru>

Подписной индекс журнала в каталоге «Пресса России» 39491
Тираж 200 экз. Заказ 24836
Дата выхода в свет 29.07.2025

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.

Academician of RAS, Doctor of Engineering,
Professor, Chairman of Editorial Board (The Russian Federation)

Deputy Chief Editor

Khalimanovich Vladimir I.

PhD in Physics and Mathematics, Professor (The Russian Federation)

Executive Secretary

Khnykin Anton. V.

PhD in Engineering, Associate Professor (The Russian Federation)

Editorial Board

Alifanov Oleg M.

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

Annin Boris D.

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

Popov Garry A.

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

Shabanov Vasily Ph.

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

Shaidurov Vladimir V.

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

Vasiliev Valery V.

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

Makhutov Nikolay A.

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

Petrukovich Anatoly A.

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

Belyaev Boris A.

Doctor of Engineering, Professor (The Russian Federation)

Chebotarev Victor E.

Doctor of Engineering, Professor (The Russian Federation)

Garin Eugene N.

Doctor of Engineering, Professor (The Russian Federation)

Khartov Victor V.

Doctor of Engineering, Professor (The Russian Federation)

Kosenko Victor E.

Doctor of Engineering, Professor (The Russian Federation)

Krasilshchikov Michael N.

Doctor of Engineering, Professor (The Russian Federation)

Medvedtskiy Alexander L.

Doctor of Physics and Mathematics (The Russian Federation)

Nadiradze Andrey B.

Doctor of Engineering, Professor (The Russian Federation)

Ovchinnikov Sergey G.

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

Panko Sergey P.

Doctor of Engineering, Professor (The Russian Federation)

Pchelyakov Oleg P.

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

Cherniavsky Alexander G.

(The Russian Federation)

Editorial Council

Golovenkin Eugene N.

Doctor of Engineering, Professor, Professor (The Russian Federation)

Dvirny Valery V.

Doctor of Engineering, Professor (The Russian Federation)

Lopatin Alexander V.

Doctor of Engineering, Professor (The Russian Federation)

Okhotkin Kirill G.

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

Ponomarev Sergey V.

Doctor of Physics and Mathematics (The Russian Federation)

Khartov Stanislav V.

PhD in Engineering (The Russian Federation)

Matveev Stanislav A.

PhD in Engineering (The Russian Federation)

Nepomnyashy Oleg V.

PhD in Engineering, Associate Professor (The Russian Federation)

Simunin Mikhail M.

PhD in Engineering, Associate Professor (The Russian Federation)

Smotrov Andrey V.

PhD in Engineering (The Russian Federation)

Sukhotin Vitaly V.

PhD in Engineering, Associate Professor (The 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.sciup.org

В номере

Contents

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

**А. В. Азин, С. В. Пономарев,
С. В. Рикконен, А. В. Васильев**
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ
МАТЕРИАЛОВ ИМПЕДАНСНЫМ МЕТОДОМ

Е. Д. Михов, А. В. Караванов
УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМАМИ,
ВКЛЮЧАЮЩИМИ В СЕБЯ ОБЪЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ
И ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ

**НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ
В КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ**

Л. М. Ковальчук, Т. В. Бурнышева
ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОГРИДНЫХ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК
НА ПРОЧНОСТЬ, УСТОЙЧИВОСТЬ
И ЖЕСТКОСТЬ ПРИ КРУЧЕНИИ

КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Т. Г. Орешенко, И. В. Назаров, А. С. Чапаева
РАЗРАБОТКА АППАРАТУРЫ ДЛЯ МОНИТОРИНГА
ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ
НА БОРТУ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

О. И. Ровняков, Д. В. Чугунин, К. В. Ануфрейчик
КОНСТРУКТИВНЫЕ И СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ
РЕШЕНИЯ НА ОСНОВЕ СЛАБОТОЧНОЙ
ЭЛЕКТРОНИКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ
ХАРАКТЕРИСТИК КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ

ROCKET AND SPACE EQUIPMENT

**A. V. Azin, S. V. Ponomarev,
S. V. Rikkonen, A. V. Vasilyev**
5 DETERMINATION OF THE ELASTIC MODULUS
OF MATERIALS BY THE IMPEDANCE METHOD

E. D. Mikhov, A. V. Karavanov
14 CONTROL OF SYSTEMS
INCLUDING CONTROL OBJECTS
AND PARAMETRIC REGULATORS

**NEW MATERIALS AND TECHNOLOGIES
IN SPACE EQUIPMENT**

L. M. Kovalchuk, T. V. Burnysheva
23 INVESTIGATION OF ANISOGRID
CYLINDRICAL SHELLS
FOR STRENGTH, STABILITY
AND TORSIONAL RIGIDITY

SPACE INSTRUMENT ENGINEERING

T. G. Oreshenko, I. V. Nazarov, A. S. Chapaeva
41 DEVELOPMENT OF EQUIPMENT FOR MONITORING
THE PARAMETERS OF SOLAR PANELS ON BOARD
SMALL SPACECRAFT

O. I. Rovnyakov, D. V. Chuginin, K. V. Anufreichik
48 LOW-CURRENT ELECTRONICS SCHEMATIC
AND DESIGN SOLUTIONS
FOR SPACE PLASMA CHARACTERISTICS
MEASUREMENT

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ МАТЕРИАЛОВ ИМПЕДАНСНЫМ МЕТОДОМ

А. В. Азин✉, **С. В. Пономарев,**
С. В. Рикконен, А. В. Васильев

*Национальный исследовательский
Томский государственный университет
г. Томск, Российская Федерация*

Эффективно применяемый импедансный метод неразрушающего контроля для элементов космической техники является сравнительным методом обнаружения дефектов материалов. Однако определение деформационных характеристик материалов, в частности модуля упругости, этим методом затруднительно. Цель работы: расширение возможностей импедансного метода для определения модуля упругости материала. Предложен метод локального динамического воздействия на поверхность материала, в котором возможен анализ составляющих механического импеданса с определением модуля упругости материала. Устройство, реализующее данный метод, представляет собой ультразвуковой излучатель с индентором для контактного воздействия на поверхность исследуемого материала. В конструкцию устройства включены датчики ускорения и силы. Ультразвуковой излучатель при одностороннем доступе к объекту оказывает минимальное силовое воздействие на исследуемый материал, что особенно важно при неразрушающем контроле. Для получения информации о физико-механических характеристиках материала используется частотный диапазон, при котором все сигналы датчиков имеют гармоническую форму. В режиме гармонических колебаний колебательная система «устройство-исследуемый материал» работает как единое целое. Наличие режима гармонических колебаний позволяет при обработке экспериментальных данных о колебательной системе использовать простые математические методы (символический метод анализа систем и правила преобразования электрических цепей) без потери информации об объекте. Предложенный метод позволяет определять модуль упругости материалов в зависимости от частоты механического воздействия с погрешностью не более 10 %.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, модуль упругости, импедансный метод, ультразвуковой излучатель.

Введение

Известно большое число методов определения модуля упругости. Чаще всего используют статические методы определения модуля упругости. Точность статических методов достаточна для технических расчетов, особенно применительно к условиям работы деталей, близким к статическим условиям. Возможности статических методов ограничены, так как для испытаний требуются образцы довольно большого размера и определенной формы [1–5]. Кроме того, для обеспечения достаточной точности необходимы значительные деформации, что относит

статические методы к разрушающим методам контроля.

Преимущества динамических методов испытаний физико-механических характеристик (например, модуля упругости) материалов – их более высокая точность по сравнению со статическими, а также гибкость методики [6], позволяющей проследить на одном и том же образце зависимость модуля упругости материала от различных факторов, в частности от температуры, без значительного силового воздействия [6–8]. К динамическим относятся следующие методы:

– Резонансный метод определения модуля упругости широко распространен при исследованиях зависимости модуля упругости материала от температуры. Собственную частоту колебаний измеряют обычно на стержневых образцах посто-

✉ antonazin@niipmm.tsu.ru

© Ассоциация «ТП «НИСС», 2025

янного сечения. В исследуемом образце возбуждаются упругие резонансные колебания и измеряется их резонансная частота. На основе геометрических размеров образца и его плотности определяется значение модуля упругости материала [9].

– Метод измерения скоростей распространения акустических волн (продольных, сдвиговых, поперечных и т.д.). Через соотношение продольных и сдвиговых (поперечных) волн определяются коэффициент Пуассона и модуль упругости материала [10].

– Виброакустический метод. При низких скоростях воздействия можно утверждать, что значения динамического и статического модуля упругости тождественны или отличаются между собой незначительно.

Полезная информация о состоянии колебательной системы (КС) для всех методов неразрушающего контроля (НК) формируется при механическом воздействии на объект, при этом контактное воздействие может деформировать объект исследования, оставлять отпечатки в месте воздействия индентора, нарушать функционирование объекта исследования. Поэтому разработка методов НК с минимальным уровнем воздействия на исследуемый материал является актуальной задачей.

Виброакустическим методом определения физико-механических свойств материалов и НК называют метод, основанный на регистрации, измерении и анализе параметров виброакустических колебаний, возникающих при работе контролируемого объекта [11]. Большинство устройств виброакустической дефектоскопии являются оценивающими методами условного размера и дискретной глубины залегания дефектов [11–18]. Определение физико-механических характеристик материалов этими методами вызывает определенные трудности.

Импедансный метод НК называют сравнительным методом контроля, основанным на определении величины механического импеданса. Величина механического импеданса (определяется из отношения величины силы возбуждения

к виброскорости КС) является комплексной величиной и имеет вид (1):

$$Z = F/V = R + j(\omega \cdot M_{\text{пч}} - K/\omega). \quad (1)$$

Модуль механического импеданса определяется из выражения (2):

$$Z = F/V = \sqrt{R^2 + (\omega \cdot M_{\text{пч}} - K/\omega)^2}, \quad (2)$$

где R – коэффициент диссипации, в кг/с; K – жесткость КС, в Н/м; V – амплитуда виброскорости КС, в м/с; F – сила возбуждения КС, в Н; ω – угловая частота, в 1/с; $M_{\text{пч}}$ – масса подвижных частей ультразвукового (УЗ) излучателя, в кг.

Обычно составляющая диссипации КС составляет доли процента от кинетической и потенциальной энергии системы. Сравнивая величины модуля механического импеданса при разных позициях излучателя, можно определить наличие и размеры дефектов материалов и конструкций [12–17].

Имея дополнительные датчики ускорения и силы в КС, можно анализировать работу отдельных частей КС, контролируя амплитуду и форму вибросмещения подвижных частей.

В КС, в которых сказывается разнообразие нелинейных процессов (наличие подсистем, нелинейность параметров, недостаточная мощность источника питания и т.д.), есть частотные диапазоны, в которых все сигналы датчиков имеют гармоническую форму, что говорит о режиме синхронного и квазисинфазного движения элементов КС – режимы гармонических колебаний (РГК) (рисунок 1а). В РГК КС работает как единое целое, а все сигналы имеют синусоидальную форму. При этом появляется возможность для определения физико-механических характеристик материалов применять упрощенные методики анализа работы КС, приведенные в [12]. Режим РГК будет соответствовать своему диапазону частот, который для этой конструкции КС может не совпадать с резонансом всей системы. Вне режима гармонических

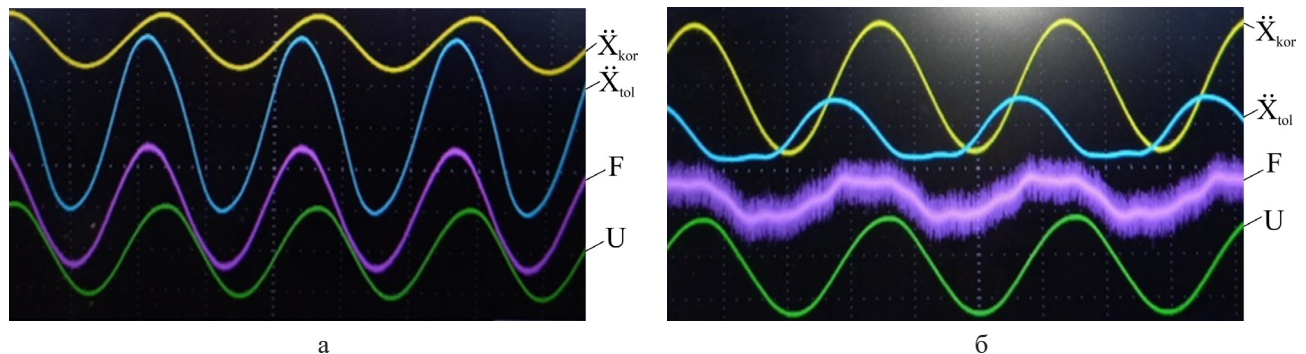


Рисунок 1. Осциллограммы сигналов, характеризующих работу КС УЗ-излучателя:
а – гармонические сигналы с датчиков при частоте $f = 22,3$ кГц и б – негармонический сигнал с датчиков при частоте $f = 17,10$ кГц

колебаний колебания носят негармонический характер (рисунок 1б), и возможности правильно определить физико-механические характеристики резко снижаются. На резонансе увеличение амплитуды колебаний может привести систему в зону «неустойчивой» работы, которая характеризуется несинусоидальностью сигналов датчиков.

1. Методы испытаний

Рассматривается метод локального динамического воздействия на поверхность материала для определения физико-механических характеристик материала пластины в зависимости от частоты воздействия (рисунок 2).

Разработанный метод основан на регистрации величин ускорения элементов КС и силы воздействия непосредственно на нагрузку. В этом случае сам преобразователь электрической мощности в механическую мощность «чувствует» изменение акустического импеданса механической КС в зависимости от физико-механических характеристик исследуемого материала и от состояния конструкции при появлении дефектов [12, 17–21].

На рисунке 2 представлен эскиз УЗ-излучателя резонансного типа. Пьезоактюатор излучателя расположен на одной оси с датчиком силы (ДС), толкателем, с упругим элементом предварительного поджатия и исследуемым объектом (нагрузкой, для случая на рисунке 2б). В конструкции УЗ-излучателя присутствуют датчики для измерения ускорений толкателя и корпуса, силы от пьезоактюатора.

Сигналы (ускорение корпуса, ускорение толкателя) с акселерометров AP10 обрабатывались на предварительном усилителе ZET 440 фирмы ZETLAB. ДС пьезоактюатора представляет собой предварительно прокалиброванный пьезоактюатор.

На осциллографе GDS-72104E фирмы GW Instek снимаются сигналы: \ddot{X}_{kor} – ускорение корпуса; \ddot{X}_{tol} – ускорение толкателя; F – сила, развиваемая пьезоактюатором; $U_{пит}$ – питающее напряжение пьезоактюатора.

Коэффициенты преобразования сигналов датчиков в физические величины приведены в таблице 1.

Экспериментальные исследования по определению модуля упругости образцов из материала

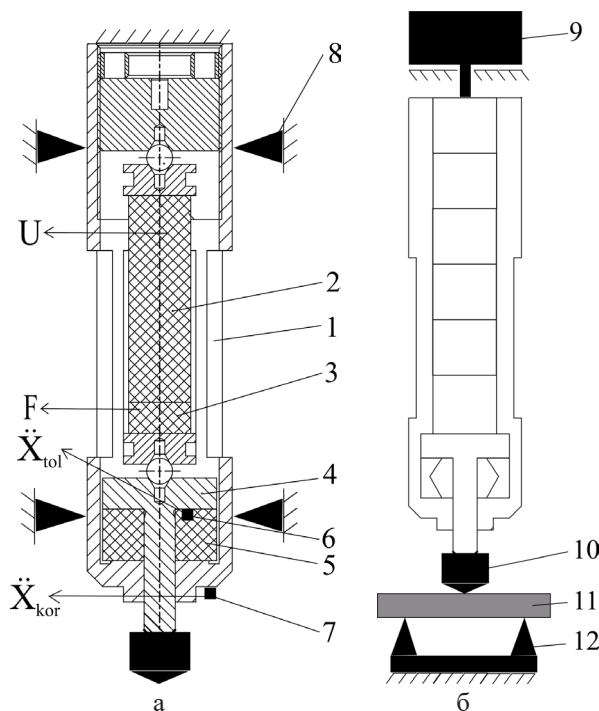


Рисунок 2. Схема экспериментальной установки исследования работы УЗ-излучателя: а – случай КЗ; б – случай с нагрузкой в виде образца материала, расположенного на двух опорах; 1 – корпус, 2 – пьезоактюатор АПМ-2-7, 3 – ДС, 4 – толкатель, 5 – упругий элемент предварительного поджатия, 6 – датчик ускорения толкателя (индентора), 7 – датчик ускорения корпуса, 8 – направляющие, 9 – пригруз, 10 – индентор, 11 – образец, 12 – опоры

дюралюминия при статической нагрузке проводились на испытательной машине Instron 5948 MicroTester в соответствии с ГОСТ 1497 [1].

Для экспериментальных исследований изготовлены образцы из дюралюминия (для УЗ-излучателя: образец в форме пластинки, размером 30x15x1,85 мм, в количестве 5 шт.; для Instron 5948 MicroTester: образец в форме лопатки, в соответствии с ГОСТ 1497, в количестве 10 шт.) и из полиметилметакрилата (ПММА) (образец в форме пластинки, размером 30x15x2,6 мм, в количестве 5 шт.).

Кроме основного режима работы УЗ-излучателя (рисунок 2а) возможны два особых режима работы:

Таблица 1

Коэффициенты преобразования сигналов датчиков в физические величины

Наименование датчика	Обозначение	Коэффициент преобразования
Ускорение корпуса	\ddot{X}_{kor}	0,174 мВ/м/с ²
Ускорение толкателя	\ddot{X}_{tol}	0,231 мВ/м/с ²
Сила пьезоактюатора	F	3,54 мВ/Н

- режим холостого хода (ХХ), когда пьезоактюатор полностью зажат и вибросмещение равно нулю;
- режим короткого замыкания (КЗ), когда пьезоактюатор свободен и вибросмещение максимальное, а сила на нагрузки равна нулю.

2. Алгоритм применения предлагаемого метода

В результате исследования работы УЗ-излучателя в режиме КЗ, проводимого в соответствии со схемой на рисунке 2а, определяется диапазон частот, при котором все элементы КС УЗ-излучателя движутся синхронно – режим гармонических колебаний. На основе анализа экспериментальных данных строятся АЧХ ускорения толкателя и силы пьезоактюатора УЗ-излучателя (рисунки 3 и 4).

Учитывая выражение (2), модуль механического импеданса без учета R и с переходом от вибро-

скорости к виброускорению при $V = \ddot{X}/\omega$ имеет вид (3):

$$Z = (F \cdot \omega) / \ddot{X} = \omega \cdot M_{\text{пч}} - K / \omega. \quad (3)$$

Сокращая левую и правую части выражения (3) на общий член ω , получаем (4):

$$F / \ddot{X} = M_{\text{пч}} - K / \omega^2. \quad (4)$$

Жесткость КС определяется из выражения (4):

$$K_{\text{сис}} = \omega^2 \left(M_{\text{пч}} - F / \ddot{X} \right), \quad (5)$$

где \ddot{X} – амплитуда ускорения индентора КС, в м/с²; $M_{\text{пч}}$ – масса подвижных частей УЗ-излучателя, в кг. На основе анализа работы УЗ-излучателя в режиме КЗ определяется жесткость конструкции УЗ-излучателя.

Предполагается, что

$$K_{\text{сис}} = K_{\text{об}} + K_{\text{кз}}, \quad (6)$$

где $K_{\text{об}}$ – жесткость испытываемого образца, в Н/м; $K_{\text{кз}}$ – жесткость УЗ-излучателя в режиме КЗ, в Н/м.

$$M_{\text{сис}} = M_{\text{об}} + M_{\text{кз}}, \quad (7)$$

где $M_{\text{кз}}$ – масса подвижных частей УЗ-излучателя в режиме КЗ, в кг; $M_{\text{об}}$ – масса испытываемого образца, в кг.

Параметры КС в режиме КЗ определяются по АЧХ КЗ УЗ-излучателя:

1. Выбирается частота в диапазоне РГК КС УЗ-излучателя – f , в Гц.

2. По экспериментальным характеристикам определяется значение виброускорения КС УЗ-излучателя для частоты f – \ddot{X} , в м/с².

3. По экспериментальным характеристикам ДС находится значение амплитуды силы пьезоактюатора для частоты f – F , в Н.

4. Жесткость УЗ-излучателя $K_{\text{кз}}$ определяется из эксперимента на его статическое сжатие на универсальной испытательной машине, например Instron 5948.

Масса $M_{\text{пч}}$ при режиме КЗ рассчитывается из выражения (4).

Алгоритм определения модуля упругости образца (схема испытания приведена на рисунке 2б):

1. Выбирается частота в диапазоне РГК КС УЗ-излучателя – f , в Гц.

2. По экспериментальным характеристикам определяется значение виброускорения КС УЗ-излучателя для частоты f – \ddot{X} , в м/с².

3. По экспериментальным характеристикам ДС находится значение амплитуды силы пьезоактюатора для частоты f – F , в Н.

4. Допускаем $M_{\text{кз}} = M_{\text{пч}}$ при частоте f . Тогда жесткость образца определяется из выражения:

$$K_{\text{об}} = K_{\text{сис}} - K_{\text{кз}}, \quad (8)$$

и модуль упругости материала образца равен:

$$E = K_{\text{об}} \cdot \Psi(h, l, b), \quad (9)$$

где Ψ – функция, определяемая решением контактной задачи взаимодействия индентора с поверхностью образца и его закреплением; l , b , h – геометрические размеры исследуемого образца материала.

В случае если образец опирается на две опоры и представляет собой классическую однопролетную двухконсольную балку, для расчета модуля упругости образца применимо инженерное соотношение из [22]:

$$E = K_{\text{об}} \cdot l^3 / (4 \cdot h^3 \cdot b), \quad (10)$$

где l – расстояние между опорами, b – ширина и h – толщина исследуемого образца материала.

3. Экспериментальные исследования образцов дюралюминия

В результате проведенных экспериментальных исследований определен РГК для КС УЗ-излучателя в режиме КЗ (рисунки 3 и 4). РГК для данной КС лежит в диапазоне частот 21,8–22,5 кГц.

Эксперимент по определению модуля упругости образца проводился в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 2б. В соответствии с приведенным ранее алгоритмом определен модуль упругости материала образцов из дюралюминия $E_{\text{ал}} = 59$ ГПа.

Погрешность определения жесткости образца не превышала 10 %. Соответственно, при данной

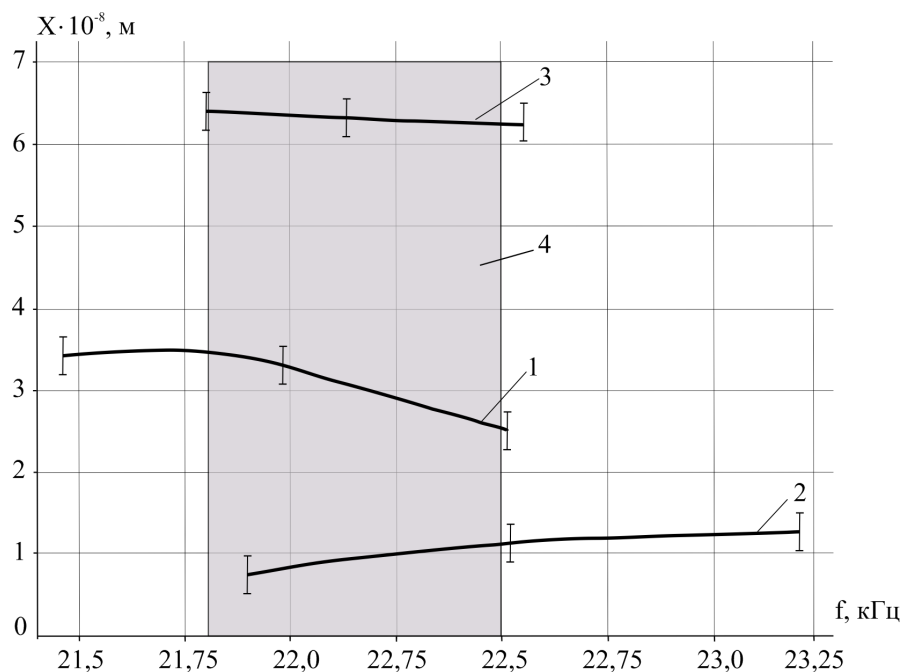


Рисунок 3. Экспериментальные зависимости вибросмещений работы КС: 1 – режим КЗ, 2 – образец дюралюминия, 3 – образец ПММА, 4 – диапазон частот РГК

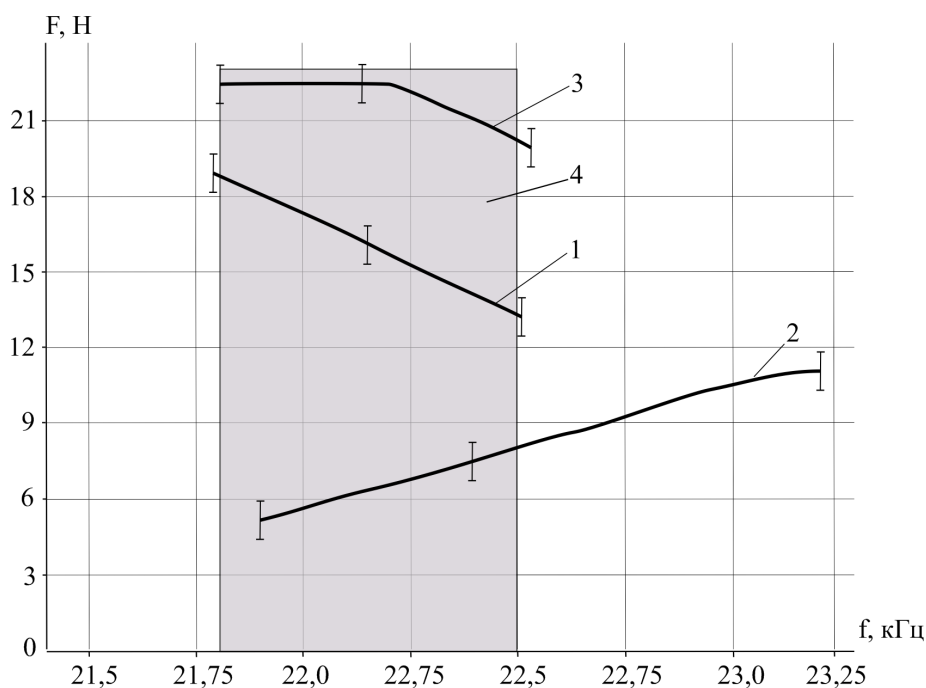


Рисунок 4. Экспериментальные зависимости силы при работе КС: 1 – режим КЗ, 2 – образец дюралюминия, 3 – образец ПММА, 4 – диапазон частот РГК

погрешности наиболее вероятное значение модуля упругости находится в диапазоне от 53 до 65 ГПа.

Энергия КС в зависимости от частоты питающего напряжения рассчитывается по формуле.

$$W_{\text{сис}} = F \cdot X / 2. \quad (11)$$

Эксперименты позволяют говорить о малом энергетическом воздействии УЗ-излучателя на объект исследования. Амплитуда энергии в ди-

апазоне гармонических сигналов лежит в пределах – $4 \cdot 10^{-8}$ Дж. Испытуемый образец при такой энергии воздействия за время эксперимента 30–60 секунд нагреться не успевает.

Для проверки результатов предлагаемого метода дополнительно проведены испытания образцов растяжением из дюралюминия для определения модуля упругости материала на испытательной машине Instron 5948. По результатам экспериментов модуль упругости дюралюминия

составил 63 ГПа. Отклонение значения модуля упругости образцов дюралюминия, определенного по предлагаемому методу, от значения модуля упругости, определенного по ГОСТ 1497, не превышает 7 %.

4. Экспериментальные исследования образцов из ПММА

Модуль упругости исследуемых образцов определен классическим методом упругой деформации изгиба при статическом воздействии. Пластины прямоугольного сечения из исследуемого ПММА жестко зажаты с одной стороны и представляют собой консольную балку. Нагружение свободного конца консольной балки постоянной силой произведено в диапазоне упругой деформации материала. В условиях равновесия определен максимальный прогиб пластин под действием приложенной силы, который характеризует жесткость конструкции и упругие свойства материала согласно закону Гука.

В соответствии с (10) определен модуль упругости ПММА при статическом нагружении пластины толщиной 2,6 мм, равный 3,27 ГПа. В соответствии с информацией, приведенной в [22], значение модуля упругости ПММА находится в диапазоне от 2 до 4 ГПа. Жесткость образца при статической нагрузке равна $K = 5 \cdot 10^5$ Н/м.

Экспериментальные данные, полученные при динамическом нагружении, показывают увеличение значений жесткости и модуля упругости ПММА за счет изменения свойств материала относительно их значений при статическом нагру-

жении. Так, увеличение жесткости и модуля упругости материала ПММА с повышением частоты динамического воздействия от 0,3 до 1 кГц подтверждается исследованием [10].

Рост значения модуля упругости до 5 ГПа при высокоскоростной деформации в случае ударно-волнового деформирования ПММА отмечен в исследовании [6]. Используя данные статьи [6], определен модуль упругости образца из ПММА при частоте 22,2 кГц (скорость деформации $V_e = 2,1$ с⁻¹), он составляет 5 ГПа.

В соответствии с приведенным ранее алгоритмом определен модуль упругости материала образцов ПММА $E = 5,1$ ГПа.

По результатам проведенных экспериментальных исследований и информации из сторонних источников составлена зависимость модуля упругости материала ПММА от частоты механического воздействия (рисунок 5).

Заключение

В работе представлен метод локального динамического воздействия на поверхность материала для определения физико-механических характеристик материалов. Энергия механического воздействия на исследуемый образец имеет порядок 10^{-8} Дж, что говорит о низком уровне воздействия УЗ-излучателя на исследуемый образец.

На основе проведенных экспериментальных исследований на образцах дюралюминия и ПММА выявлен интервал частот, где временные зависимости силы, ускорения и питающего напряжения являются гармоническими функциями, что позволяет применять известные простые методы

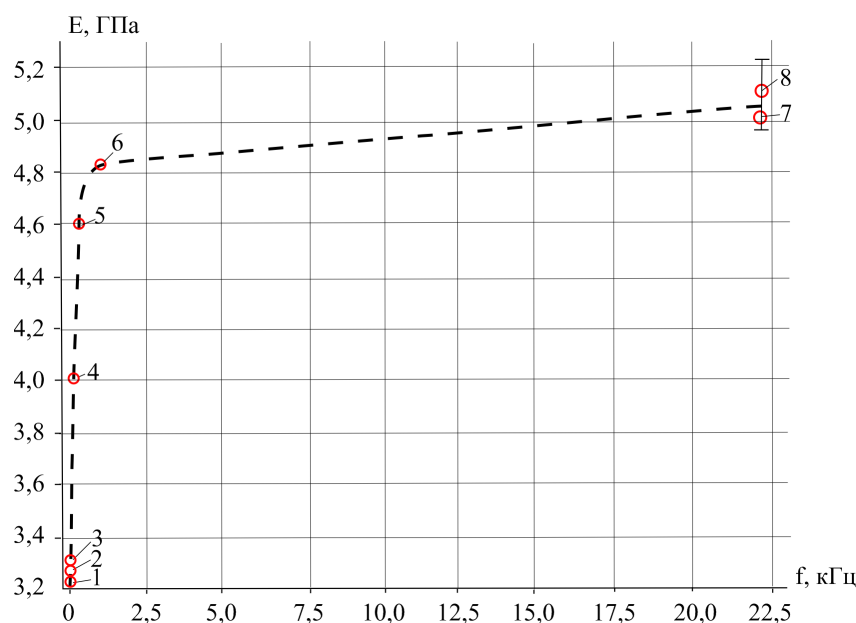


Рисунок 5. Зависимость модуля упругости ПММА от частоты механического воздействия.

Точки на кривой: 2 и 8 – результаты проведенных экспериментальных исследований;
1 и 3–7 – результаты сторонних исследований [3–7, 10] (1 – [3,5], 3–[4], 4 – [7], 5 и 6 – [10], 7 – [6])

обработки без сложной аппаратуры и существенной потери информации.

Разработанный метод позволяет определять модуль упругости материалов в зависимости от частоты механического воздействия с погрешностью не более 10 %.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSWM-2020-0036).

Список литературы

- [1] ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытания на растяжение. М., 2008. 24 с.
- [2] Judawisastra H. et al. Определение модуля упругости термопластичных полимеров с помощью ультразвукового импульсно-эхографического метода // Серия конференций ИОР: Материаловедение и инженерия. 2019. Т. 547. № 012047. 11 с. DOI:10.1088/1757-899X/547/1/012047.
- [3] Zhang et al. Моделирование молекулярной динамики и эксперимент по анализу механических свойств композитов ПММА/SiO₂ на основе межфазного взаимодействия // AIP Advances. 2023. Т. 13. № 085311. 7 с. DOI: 10.1063/5.0148636
- [4] Свойства полистироловых и поли(метилметакрилатных) (ПММА) микросфер [Электронный ресурс]. URL: <https://www.bangslabs.com/material-properties-polystyrene-and-polymethyl-methacrylate-pmma-microspheres>. (дата обращения: 15.10.2024).
- [5] Кухлинг Х. Справочник по физике: М.: Мир, 1982. 520 с.
- [6] Мержиевский Л. А., Воронин М. С. Моделирование ударно-волнового деформирования полиметилметакрилата // Физика горения и взрыва. 2012. Т. 48. № 2. С. 113–123.
- [7] Abdel-wahab A. A., Ataya S., Silberschmidt V. V. Механическое поведение ПММА в зависимости от температуры: экспериментальный анализ и моделирование // Тестирование полимеров. 2017. Т. 58. С. 86–95. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting>
- [8] Модель деформирования и разрушения ПММА [Электронный ресурс]. URL: <https://pandia.ru/text/78/179/54531.php> (дата обращения: 15.10.2024).
- [9] ГОСТ Р 56803–2015. Пластмассы. Определение механических свойств при динамическом нагружении. М.: 2016. 3. 13 с. (Колебания изгиба. Метод резонансной кривой).
- [10] Определение коэффициента Пуассона и модуля упругости с помощью датчиков Р- и S-волн [Электронный ресурс]. URL: <https://media.screeningeagle.com/asset/Downloads/Determining%20Poissons%20ratio%20and%20Elastic%20modulus.pdf>. (дата обращения: 15.10.2024).
- [11] Костюков В. Н., Науменко А. П. Основы виброакустической диагностики и мониторинг машин: Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. 360 с.
- [12] Азин А. В. и др. Настройка резонансных режимов работы ультразвукового излучателя при одностороннем доступе к объекту // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 10. С. 199–209.
- [13] Акустический импедансный преобразователь: а.с. 1629838, СССР. № 4670342/28; заявл. 30.03.89; опубл. 23.02.91, Бюл. № 7. 2 с.
- [14] Совершенствование методов ультразвуковой дефектоскопии многослойных конструкций воздушных судов [Электронный ресурс]. URL: <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=605793>. (дата обращения: 15.10.2024).
- [15] Мурашов В. В. Применение ультразвукового резонансного метода для выявления дефектов клееных конструкций // Испытания материалов. Авиационные материалы и технологии. 2018. № 1 (50). С. 88–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-88-94.
- [16] Чертищев В. Ю. и др. Определение размера глубины залегания дефектов в многослойных сотовых конструкциях из ПКМ по величине механического импеданса // Испытания материалов. Авиационные материалы и технологии. 2020. № 3 (60). С. 72–94.
- [17] Хмелев В. Н. и др. Разработка пьезоэлектрических ультразвуковых колебательных систем для интенсификации процессов в газовых средах // Известия ТулГУ. Технические науки. 2010. № 1. С. 148–157.
- [18] Азин А. В. и др. Математическое моделирование ультразвукового излучателя резонансного типа для подготовки высоковязкой нефти к транспорту // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332, № 11. С. 161–169. DOI: 10.18799/24131830/2021/11/3433.
- [19] Азин А. В., Богданов Е. П., Рикконен С. В. Моделирование передачи акустической энергии через многослойную систему для измерения реологических свойств углеводородов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334, № 3. С. 186–196. DOI: 10.18799/24131830/2023/3/3953.
- [20] Рикконен С. В., Пономарев С. В., Азин А. В. Моделирование колебательных процессов пьезоэлектрического преобразователя // Вестник ТГУ. Математика и механика. 2015. № 29 (34). С. 86–95. DOI: 10.17223/19988621/34/8.

- [21] Панич А. Е. Пьезокерамические актюаторы. Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2008. 159 с.
[22] ГОСТ 10667–90. Стекло органическое листовое. М., 1990. 35 с. (Технические условия).

DETERMINATION OF THE ELASTIC MODULUS OF MATERIALS BY THE IMPEDANCE METHOD

**A. V. Azin, S. V. Ponomarev,
S. V. Rikkonen, A. V. Vasilyev**

*Tomsk State University
Tomsk, The Russian Federation*

The impedance method is widely used for non-destructive testing of structural elements of space technology. However, this method is not used to determine the physical and mechanical characteristics of materials. The aim of the work is to expand the capabilities of the impedance method for determining the modulus of material elasticity. A method of local dynamic action on the surface of the material is proposed. This method contains an algorithm for analyzing the components of mechanical impedance to determine the elastic modulus of a material. To implement the proposed method, an ultrasonic emitter with an indenter is used for contact action on the surface of the material under study. The ultrasonic emitter contains acceleration and force sensors. To obtain information about the physical and mechanical characteristics of the material, a certain frequency range is used. The frequency range is determined from the condition – all signals of the ultrasonic emitter sensors have a harmonic shape. This condition allows us to use simple mathematical methods for processing experimental data (symbolic method of system analysis and rules for converting electrical circuits) without losing information about the object. The proposed method makes it possible to determine the elastic modulus of materials depending on the frequency of mechanical impact with an error of no more than 10 %.

Keywords: non-destructive testing, elastic modulus, impedance method, ultrasonic emitter.

References

- [1] GOST 1497–84. Metals. Methods of tension test. М., 2008. 24 p.
- [2] Judawisastra H. et al. Elastic Modulus Determination of Thermoplastic Polymers with Pulse-Echo Method Ultrasonic Testing // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng, 2019. Vol. 547, no. 012047, 11 p. DOI:10.1088/1757-899X/547/1/012047.
- [3] Zhang et al. Molecular dynamics simulation and experiment on analyzing mechanical properties of PMMA/SiO₂ composites based on interfacial interaction // AIP Advances, 2023. Vol. 13, no. 085311, 7 p. DOI: 10.1063/5.0148636.
- [4] Material Properties of Polystyrene and Poly (methyl methacrylate) (PMMA) Microspheres. Available at <https://www.bangslabs.com/material-properties-polystyrene-and-polymethyl-methacrylate-pmma-microspheres>. (Accessed: 15.10.2024).
- [5] Kuchling H. Physik. Veb Fachbuchverlag Leipzig, 1980. 520 p.
- [6] Merzhievskii L. A., Voronin M. S. Modeling of shock-wave deformation of polymethyl metacrylate // Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2012. Vol. 48, issue № 2, pp.113–123.
- [7] Abdel-wahab A. A., Ataya S., Silberschmidt V. V. Temperature-dependent mechanical behavior off PMMA: Experimental analysis and modeling // PolymerTesting, 2017. Vol. 58, pp. 86–95. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymeresting>.
- [8] Model of deformation and destruction of PMMA. Available at <https://pandia.ru/text/78/179/54531.php> (Accessed: 15.10.2024).
- [9] GOST R 56803–2015. Plastics. Determination of dynamic mechanical properties. М.: 2016. 3. 13 p. (Flexural vibration. Resonance-curve method).

- [10] Determination of Poisson's Ratio and the Modulus of Elasticity by measuring with P-and S-wave transducers. Available at <https://media.screeningeagle.com/asset/Downloads/Determining%20Poissons%20ratio%20and%20Elastic%20modulus.pdf>. (Accessed: 15.10.2024).
- [11] Kostyukov V.N, Naumenko A. P. Basics of vibroacoustic diagnostics and machine monitoring. Omsk: Omsk State Technical University Publishing House, 2011. 360 p.
- [12] Azin A. V. et al. Configurations of ultrasonic emitter resonance modes for unilateral access to an object. // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 334, 10, pp. 199–209. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/10/4346>.
- [13] Acoustic impedance converter: inventor's certificate № 1629838, USSR. Application: 4670342/28, 30.03.89; date of publication: 23.02.91, Bull. № 7. 2 p.
- [14] The improvement of ultrasonic flaw detection techniques for multilayer aircraft structures. Available at: <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=605793>. (Accessed: 15.10.2024).
- [15] Murashov V.V. Application of the ultrasonic resonance method for detection of defects of glued constructions // Aviation materials and technologies, 2018, 1 (50), pp. 88–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-88-94.
- [16] Chertishchev V. Yu. et al. Determination of the size and depth of defects in multilayer PCM honeycomb structures based on the mechanical impedance value // Aviation materials and technologies, 2020. Vol. 3(60), pp. 72–94.
- [17] Khmelev V.N. et al. Design of piezoelectric ultrasonic vibratory systems for intensification of processes into gaseous mediums // Izvestija TulGU. Tehnicheskie nauki, 2010. Vol. 1. pp. 148–157.
- [18] Azin A. V. et al. Mathematical modeling of a resonant-type ultrasonic emitter for preparing high-viscosity oil for transport // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2021. Vol. 332, issue 11, pp. 161–169. DOI: 10.18799/24131830/2021/11/3433.
- [19] Azin A. V., Bogdanov E. P., Rikkonen S. V. Simulation of acoustic energy transfer through a multilayer system for changing the rheological properties of hydrocarbons // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2023. Vol. 334, issue 3, pp. 186–196. DOI: 10.18799/24131830/2023/3/3953.
- [20] Rikkonen S. V., Ponomarev S. V., Azin A. V. Simulation of oscillatory processes in a piezoelectric transducer // Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics, 2015. Vol. 29(34), pp.86–95. DOI: 10.17223/19988621/34/8.
- [21] Panich A. E. Piezoceramic actuators. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press, 2008. 159 p.
- [22] GOST 10667–90. Sheet organic glass. M., 1990. 35 p. (Specifications).

Сведения об авторах

Азин Антон Владимирович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета. Окончил Томский государственный университет в 2010 году. Область научных интересов: механика деформируемого твердого тела, космическая техника.

Пonomarev Сергей Васильевич – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета. Окончил Томский государственный университет в 1971 году. Область научных интересов: механика деформируемого твердого тела, космическая техника.

Рикконен Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, инженер-исследователь Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета. Окончил Томский политехнический институт в 1973 году. Область научных интересов: электромеханика, разработка вибро- и пьезопроводов, реология нефти, механика деформируемого твердого тела.

Васильев Александр Викторович – аспирант Томского государственного университета. Окончил Томский государственный университет в 1999 году. Область научных интересов: механика деформируемого твердого тела, космическая техника.

УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМАМИ, ВКЛЮЧАЮЩИМИ В СЕБЯ ОБЪЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ

Е. Д. Михов✉, А. В. Караванов

Сибирский федеральный университет
г. Красноярск, Российская Федерация

В статье рассматривается новый алгоритм управления системами с длительными переходными процессами. Актуальность исследования обусловлена растущим использованием малых космических аппаратов для различных целей, включая научные исследования, связь и наблюдение. Эти аппараты имеют ограниченный ресурс корректировки движения из-за износа дополнительных двигателей и ограниченного объёма рабочего тела. Разработка и внедрение новых алгоритмов управления, направленных на сокращение времени корректировки (переходного процесса), могут значительно повысить эффективность использования малых космических аппаратов. Это не только увеличит срок их службы, но и позволит расширить возможности их применения в различных областях. Разработанный алгоритм основан на непараметрической оценке функции регрессии и состоит из двух частей: накопленного опыта об объекте и поискового шага. В качестве объекта управления был взят безынерционный процесс, управляемый П-регулятором. В такой системе возникает переходный процесс. Для оценки эффективности управления было выбрано время переходного процесса как критерий. Проведённое сравнение показало, что управление системой с помощью П-регулятора менее эффективно по сравнению с разработанным алгоритмом. Результаты исследования могут быть полезны для разработки более эффективных систем управления, особенно в условиях, когда требуется высокая скорость регулирования.

Ключевые слова: П-регулятор, система управления, непараметрическая оценка функции регрессии, переходный процесс, малые космические аппараты.

Введение

В настоящее время малые космические аппараты (МКА) широко используются для решения различных задач, таких как научные исследования, связь, наблюдение и другие. Они представляют собой важный инструмент для развития космических технологий и расширения наших знаний о космосе. Однако каждый МКА имеет ограниченный ресурс корректировки движения, что обусловлено износом дополнительных двигателей и ограниченным объёмом рабочего тела.

Одним из способов повышения эффективности использования МКА является разработка и внедрение новых алгоритмов управления, направленных на сокращение времени корректировки (переходного процесса). Это позволит не только увеличить срок службы аппаратов, но и расширить возможности их применения в различных областях.

Целью данной работы является разработка алгоритма управления, основанного на непараметрической оценке функции регрессии, который позволит снизить время переходного процесса в объектах управления.

Результаты данной работы могут быть использованы для разработки более эффективных систем управления МКА, что позволит повысить их эффективность и продлить срок службы.

В настоящее время основными инструментами управления в различных отраслях являются П-, И- и ПИД-регуляторы [1–4]. П-регуляторы, И-регуляторы и ПИД-регуляторы остаются популярными благодаря своей простоте, эффективности, гибкости и широкому спектру применения.

Также для управления техническими системами активно применяются адаптивные (самонастраивающиеся) системы управления. Подобные системы управления позволяют настроить схему управления на эффективную работу без участия оператора и в настоящее время активно развиваются [5–8]. Используются адаптивные системы

✉ edmihov@mail.ru

© Ассоциация «ТП «НИСС», 2025

во многих технологических, производственных процессах, а также в других областях человеческой деятельности (экономика, социология и др.).

Вышеописанные типы регуляторов при должной настройке качественно решают задачу управления различными процессами. Тем не менее разработка новых методов и алгоритмов управления, позволяющих снизить время переходного процесса, продолжает оставаться актуальной задачей.

В статье рассматривается задача эффективно-го управления системой, имеющей длительный переходный процесс. В качестве такой системы рассматривается совокупность из объекта управления и П-регулятора.

Дело в том, что если объект управления и управляющее устройство объединить в единую систему и относиться к ней как к отдельному объекту типа «черный ящик», то можно обнаружить, что эта система обладает некоторыми особенностями, например, может появиться меняющаяся от случая к случаю переходная функция (в связи с адаптацией алгоритма управления). Это превращает такую систему в достаточную и модифицируемую математическую модель для первичной апробации новых разрабатываемых алгоритмов управления.

1. Постановка задачи

Рассмотрим схему управляемого процесса (рисунок 1).

Модель, которая будет использоваться в эксперименте и имитировать управляемую систему, применяется только для получения выборки на-

блюдений. Важно отметить, что эта модель неизвестна алгоритму управления. В ином случае было бы разумно сформировать алгоритм управления, основанный на функциональной зависимости между входом и выходом.

В рамках статьи изучается процесс управления системой с непараметрической неопределенностью [9]. Соответственно, алгоритму управления известны только сведения качественного характера о процессе, например, то, что объект управления является безынерционным, имеется однозначное и единое соответствие между выходными параметрами и входными воздействиями.

Продemonстрируем схему управляемого процесса (рисунок 1):

На рисунке 1 приняты следующие обозначения: $u(t)$ – управляемая переменная, $x(t)$ – выходная (контролируемая) переменная, $x^*(t)$ – внешнее задающее воздействие, $x_y(t)$ – задающее воздействие, сформированное адаптивным регулятором. Объект управления является безынерционным.

Задача состоит в формировании такого алгоритма адаптируемого регулятора, который позволит эффективно приводить управляемую систему к состоянию $x^*(t)$ с учетом возникшего переходного процесса. В качестве критерия эффективности взято время переходного процесса. Для управления переходными процессами используется принцип «перемены цели», описанный в [10]. Принцип «перемены цели» состоит в динамическом изменении целевых показателей системы на основе анализа текущей ситуации. Это позволяет оптимизировать процесс регулирования и уменьшить время перехода к желаемому состоянию.

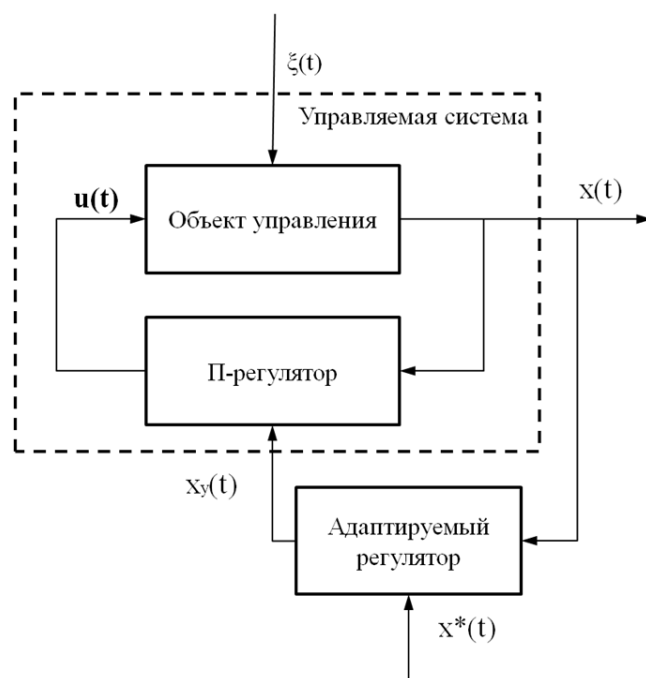


Рисунок 1. Схема управляемого процесса

2. Непараметрическая оценка функции регрессии

Непараметрическая регрессия – это метод статистического анализа, который используется для построения непараметрической функции, связывающей несколько переменных [9, 11–14]. В отличие от параметрических методов, где предполагается определённая форма функции (например, линейная или квадратичная), непараметрические методы основаны на использовании ядерных оценок, которые позволяют учесть локальные особенности данных.

Одним из основных преимуществ непараметрической регрессии является её гибкость и способность адаптироваться к различным формам зависимости между переменными. Это делает её особенно полезной в ситуациях, когда данные имеют сложную структуру.

Ядерные функции играют ключевую роль в непараметрических методах оценки функции регрессии. Они применяются для распределения весов по выборке наблюдений, которые в дальнейшем используются для оценки значения прогнозируемой переменной. Вот некоторые из наиболее распространённых видов ядерных функций:

Гауссово ядро (нормальное ядро) – одна из самых популярных ядерных функций, которая задаётся формулой

$$K(m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}m^2}, \quad (1)$$

где m – вектор признаков. Гауссово ядро придаёт больший вес ближайшим соседям и убывает с увеличением расстояния между точками, что делает его особенно полезным для учёта локальных особенностей данных.

Косинусоидальное ядро: задаётся как

$$K(m) = \frac{\pi}{4} \cos\left(\frac{\pi}{2}m\right).$$

Выбор подходящей ядерной функции зависит от конкретной задачи и характеристик данных. Например, Гауссово ядро часто используется для учёта локальных особенностей и может быть эффективно в задачах с большим количеством переменных. В исследовании в разработке алгоритма управления использовалось это ядро.

3. Разработанный алгоритм управления

Разработанный алгоритм управления относится к обучающимся системам управления. Основным принципом, который положен в основу построения систем автоматического управления (в классических регуляторах), является принцип

управления по отклонению или принцип отрицательной обратной связи.

Малое количество априорной информации об объекте приводит к необходимости совмещать изучение объекта и управление им. Именно с этой целью в рамках исследования разработан алгоритм управления, включающий в себя поисковый шаг и учет опыта управления объектом.

Математическое описание разработанного алгоритма можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} x_y(x^*(t), x(t), x(t-1)) &= \\ &= M(x^*(t), x(t)) + \Delta x(x^*(t), x(t)), \end{aligned} \quad (2)$$

где $x_y(x^*(t), x(t), x(t-1))$ – сформированный вход на П-регулятор; $M(x^*(t), x(t), x(t-1))$ – собранный опыт в управлении объектом; $\Delta x(x^*(t), x(t))$ – поисковый шаг.

Формирование опыта управления

Обучающая выборка для алгоритма непараметрической регрессии представляет собой разность между требуемым состоянием объекта и его текущим состоянием. Это означает, что вместо подбора задающего воздействия подбирается шаг, на который необходимо изменить задающее воздействие.

Опыт управления в алгоритме формируется следующим образом. Формируется выборка наблюдений, состоящая из разницы между выходным значением и задающим значением $x_s = (\Delta x_i^*, \Delta x_i)_{i=1, n}$, где n – объем выборки наблюдений, $\Delta x_i^* = x_i^* - x_i$, $\Delta x_i = x_i - x_{i-1}$.

$$M(x^*(t), x(t), x_s) = \Delta x_n^* + \frac{\sum_{i=2}^n \Delta x_i^* \Phi\left(\frac{\Delta x - \Delta x_i}{c_s}\right)}{\sum_{i=2}^n \Phi\left(\frac{\Delta x - \Delta x_i}{c_s}\right)}, \quad (3)$$

где Φ – ядро Гаусса (1).

Поисковый шаг

Поисковый шаг является второй составляющей алгоритма управления. Он позволяет определить направление изменения задающего воздействия на основе опыта управления.

Размер поискового шага может быть фиксированным или адаптивным. В первом случае размер шага определяется заранее и не изменяется в процессе работы алгоритма. Во втором случае размер шага может изменяться в зависимости от результатов предыдущих шагов.

Адаптивный размер шага позволяет более точно настроить алгоритм под конкретный объект управления и обеспечить более эффективное управление.

Важно отметить, что «неудачная» настройка поискового шага может привести к нестабиль-

ности всей управляемой системы. В связи с этим важно не пренебрегать этой частью алгоритма управления.

В качестве поискового шага при проведении исследования был взят принцип работы П-регулятора, при $K=0.4$.

$$x(x^*(t), x(t)) = K(x^*(t) - x(t)). \quad (4)$$

Таким образом, данный алгоритм управления представляет собой сочетание опыта управления, полученного с помощью алгоритма непараметрической оценки функции регрессии, и поискового шага, который определяет направление изменения задающего воздействия. Такой подход позволяет обеспечить эффективное управление объектом и учесть его специфику.

4. Математическая модель анализируемого процесса

В ходе построения математической модели будет рассмотрен процесс, описанный на рисунке 1. Используется объект, описываемый следующим равенством:

$$x(u) = u^2 - 16u + 10. \quad (5)$$

Как отображено на рисунке 1, процесс объединен в контур с П-регулятором. В проводившемся исследовании пропорциональный коэффициент П-регулятора $K_p=1.14$.

На первом этапе анализировалась способность П-регулятора управлять таким объектом.

Результаты управления представлены на рисунке 2.

Хотелось бы обратить внимание на 2 зоны, выделенные овалами. На них отчетливо видно, что изменение выходного значения объекта на единицу времени зависит от разницы между задающим воздействием и текущим состоянием объекта. Иными словами, возможно дать задающее значение, при котором достижение объектом требуемого состояния будет быстрее, чем при уравнивании задающего значения и требуемого состояния.

Повторно отметим, что эта математическая модель используется для «симуляции» системы с длительным переходным процессом.

5. Управление изучаемой системой разработанной алгоритмом управления

Постановка эксперимента

Была поставлена серия экспериментов по исследованию эффективности разработанного адаптивного алгоритма управления при управлении системой, состоящей из безынерционного объекта и П-регулятора (рисунок 1). Эффективность выражается в сокращении времени переходного процесса при управлении системой благодаря технологии «смены цели», встроенной в систему управления.

Для осуществления эксперимента было разработано специальное программное обеспечение

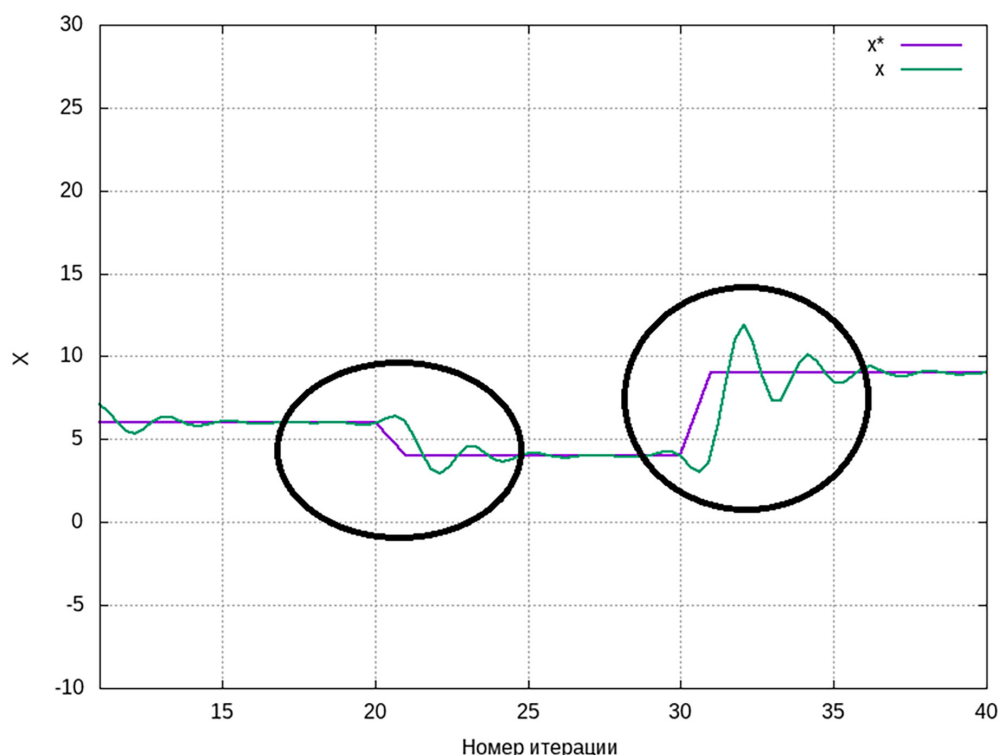


Рисунок 2. Управление представленным объектом при помощи П-регулятора

(СПО). Разработанное СПО представляет собой набор модулей, к каждому из которых можно подключить источник данных на вход или выход. Модули бывают следующего типа:

- Объект управления;
- П-регулятор;
- ПИД-регулятор;
- Разработанный адаптивный регулятор.

В качестве источника данных могут использоваться:

- Данные с текстового файла;
- Данные с другого модуля.

В качестве потребителя данных может использоваться:

- Текстовый файл;
- Другой модуль.

Для построения эксперимента была сформирована обучающая выборка $x_s = (\Delta x_i^*, \Delta x_i)$, $i = 1, n$, где n – объем выборки наблюдений, $n = 1000$. Обучающая выборка была сгенерирована путем изменения задающего воздействия каждые 50 итераций случайным образом. Процесс управления представлен на рисунке 3.

Результаты эксперимента

Представим результаты эксперимента. В первую очередь отобразим ключевые точки, на которых было произведено изменение задающего значения (таблица 1).

В качестве критерия эффективности рассмотрим процент итераций, при которых $\varepsilon = |x^* - x| < \zeta$, $\zeta = 0.2$, такая характеристика позво-

Таблица 1
Изменение задающего воздействия

Номер итерации	x^*
0	10
10	2
20	8
30	9
40	0
50	3
60	4
70	7
80	8
90	4

лит определить степень эффективности предлагаемого алгоритма.

В качестве первого эксперимента предлагается не применять внешний регулятор. Результаты управления продемонстрированы на рисунке 4.

В первом эксперименте $\varepsilon = 68 \%$. Как мы видим из рисунка 4, при частой смене задающих воздействий управляемая система почти треть времени не достигает задающего воздействия.

В качестве заключительного эксперимента в качестве внешнего регулятора был применен разработанный адаптивный алгоритм. Результаты управления продемонстрированы на рисунке 5.

В заключительном эксперименте $\varepsilon = 92 \%$. Эксперимент на рисунке 5 подтверждает эффек-

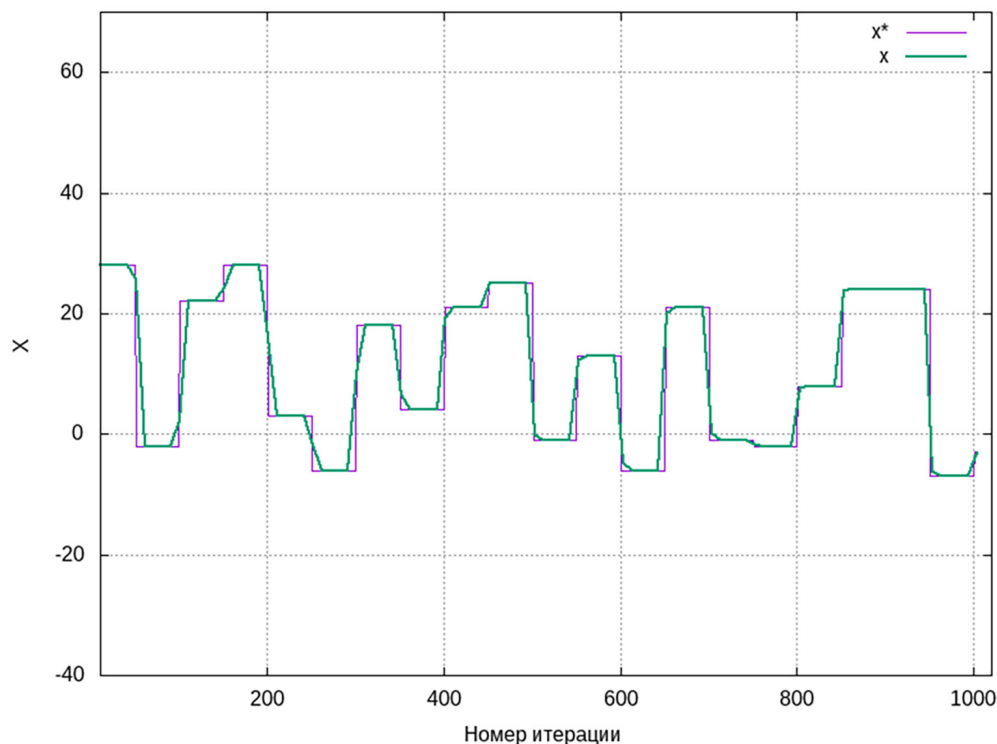


Рисунок 3. Процесс формирования обучающей выборки

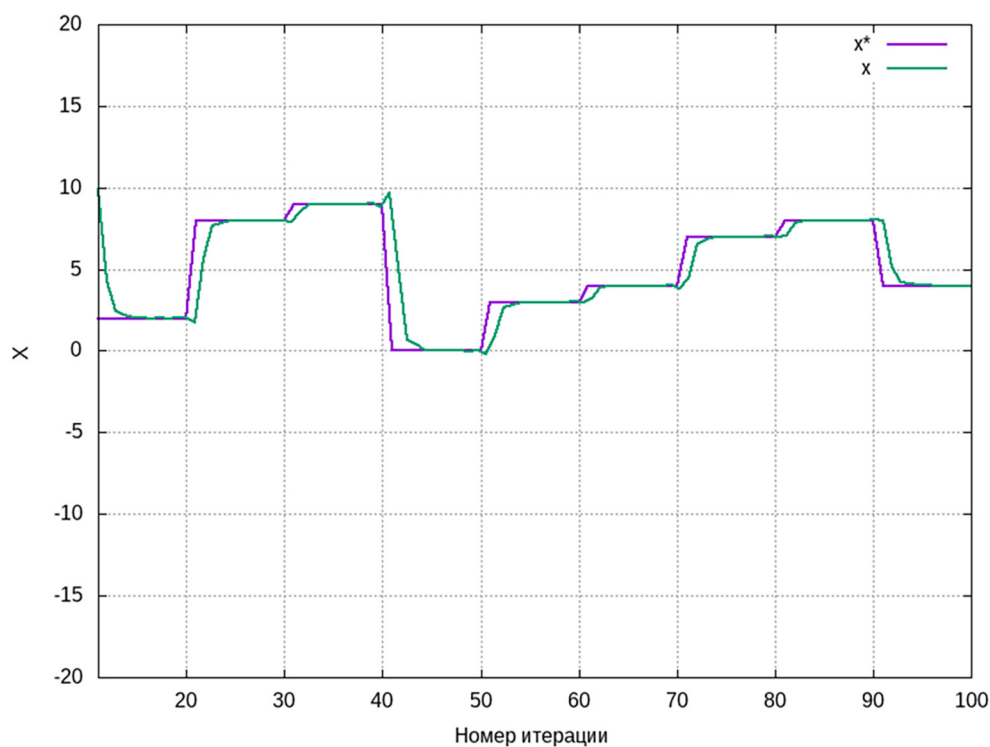


Рисунок 4. Саморегулирование системы управления

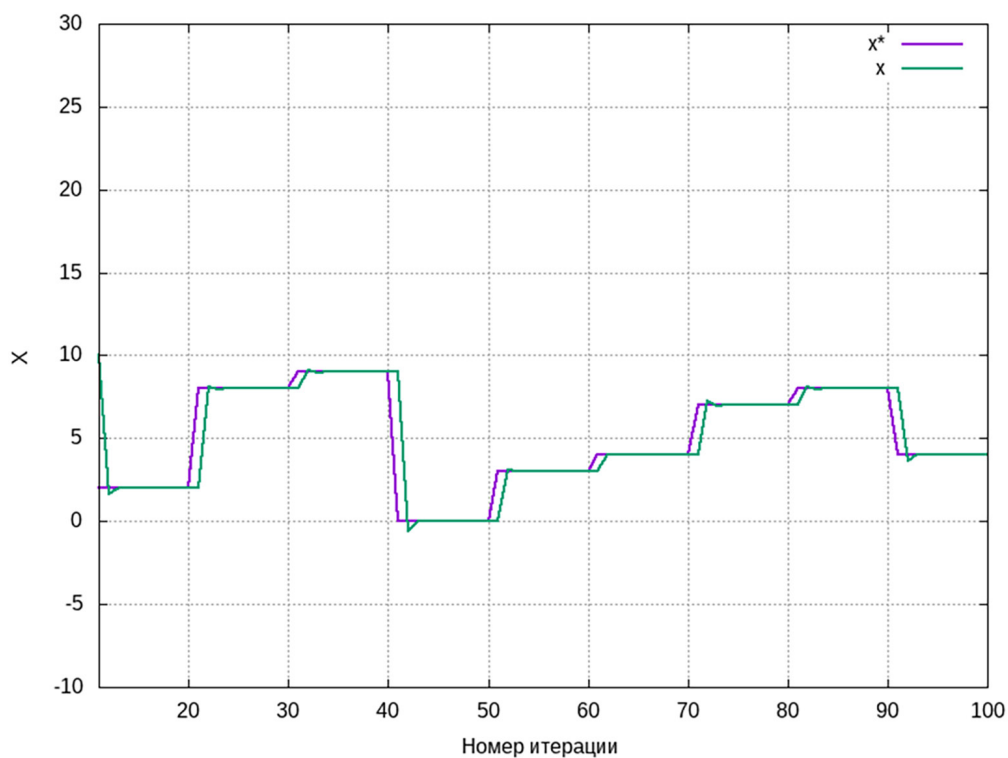


Рисунок 5. Управление исследуемой системой при помощи разработанного алгоритма

тивность разработанного алгоритма. Это позволяет предположить, что сформированный подход по управлению может увеличить эффективность управления процессами с длительными переходными процессами.

Заключение

В ходе эксперимента была подтверждена эффективность разработанного алгоритма управления. Разработанный алгоритм управления от-

носится к классу дуального управления [15–17]. Обучение алгоритма происходит при помощи непараметрической оценки функции регрессии. Благодаря технологии «смены цели», встроенной в алгоритм, время переходного процесса при управлении системой сократилось кратно. Это позволяет сделать вывод о том, что разработанный подход может быть успешно применён для управления различными системами.

Дальнейшие исследования будут направлены на более детальное изучение работы алгоритма в разных условиях. Также планируется

адаптировать разработанный алгоритм управления исследуемым объектом в случае наличия «неравномерности» в переходном процессе объекта, а также для управления многомерными объектами.

Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-20070, <https://rscf.ru/project/25-19-20070/>, гранта Красноярского краевого фонда науки.

Список литературы

- [1] Гаркушенко В. И., Дегтярев Г. Л. Теория автоматического управления: учебное пособие. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2010. 274 с.
- [2] Поляк Б. Т., Хлебников М. В. Новые критерии настройки ПИД-регуляторов // Автоматика и телемеханика. 2022. № 11. С. 62–82.
- [3] Бобырь М. В., Милостная Н. А., Ноливос К. А. Комбинация нечетко-цифрового фильтра и ПИД-регулятора в задаче управления термоэлементом // Мехатроника, автоматизация, управление. 2022. Т. 23. № 9. С. 473–480.
- [4] Баранов О. В. Алгоритм настройки стабилизирующего ПИД-регулятора квадрокоптера // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2021. Т. 64. № 10. С. 829–838.
- [5] Пшихопов В. Х., Медведев М. Ю. Управление подвижными объектами в определенных и неопределенных средах. Москва: Наука, 2011. 350 с.
- [6] Петрова Ю. С., Амелин С. А. Метод разработки адаптивного регулятора в системе управления пароперегревателя // Новые технологии в учебном процессе и производстве. 2023. С. 485–486.
- [7] Воронежская Е. Е., Мельникова В. И., Ивашкин Е. Г. Моноамины как адаптивные регуляторы развития: феномен и механизмы действия // Журнал высшей нервной деятельности им. И. П. Павлова. 2021. Т. 71. № 3. С. 295–305.
- [8] Хань Н. Д., Кузнецов В. Е., Вынг К. Н. Синтез адаптивного регулятора для повышения качества движения рулевого привода при действии внешней нагрузки // Международная научная конференция по проблемам управления в технических системах. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина)». 2021. Т. 1. С. 341–345.
- [9] Медведев А. В. Основы теории непараметрических систем. Идентификация, управление, принятие решений: монография. СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2018. 732 с.
- [10] Бушуева Н. С., Козырь Б. Ю., Запривода А. А. Многоуровневое Гибридное Управление инфраструктурными программами // Scientific Journal of Astana IT University. 2020. № 2. С. 71–85.
- [11] Бабилуа П. К., Надарая Э. А. Об одной непараметрической оценке пуассоновской функции регрессии // Теория вероятностей и ее применения. 2024. Т. 69. № 2. С. 218–232.
- [12] Орлов А. И. Вероятностно-статистические модели корреляции и регрессии // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2020. № 160. С. 130–162.
- [13] Лапко А. В., Лапко В. А. Нетрадиционная методика выбора коэффициентов размытости ядерных функций в непараметрической регрессии // Измерительная техника. 2023. № 2. С. 3–7.
- [14] Симахин В. А. и др. Непараметрические алгоритмы идентификации в задачах акустического зондирования атмосферы. 2021.
- [15] Яковенко П. Г. Синтез оптимальных управлений подвижными объектами во время переходных процессов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2008. № 12.
- [16] Чжан Е. А., Кемпф Д. А. Модификация непараметрического алгоритма моделирования и дуального управления многомерными процессами в условиях неопределенности // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 3. С. 7–13.
- [17] Раскина А. В. и др. Дуальное управление неустойчивым линейным динамическим объектом с применением алгоритмов стабилизации // Научно-технический вестник Поволжья. 2021. № 9. С. 30–33.

CONTROL OF SYSTEMS INCLUDING CONTROL OBJECTS AND PARAMETRIC REGULATORS

E. D. Mikhov, A. V. Karavanov

*Siberian Federal University
Krasnoyarsk, The Russian Federation*

The article discusses a new control algorithm for systems with long transient processes. The relevance of the study is due to the growing use of small spacecraft for various purposes, including scientific research, communication and observation. These devices have a limited resource for adjusting motion due to the wear of additional engines and a limited volume of the working fluid. Development and implementation of new control algorithms aimed at reducing the correction time (transient process) can significantly improve the efficiency of using small spacecraft. This will not only increase their service life, but will also expand the possibilities of their application in various fields. The developed algorithm is based on a nonparametric estimate of the regression function and consists of two parts: accumulated experience about the object and a search step. An inertialess process controlled by a P-controller was taken as the control object. A transient process occurs in such a system. The transient process time was chosen as a criterion to evaluate the control efficiency. The comparison showed that control of the system using a P-controller is less efficient than the developed algorithm. The results of the study can be useful for developing more efficient control systems, especially in conditions where high control speed is required.

Keywords: P-controller, control system, nonparametric estimation of the regression function, transient process, small spacecraft.

References

- [1] Garkushenko V.I., Degtyarev G.L. Theory of automatic control: Textbook. Kazan: Publishing house of Kazan. state tech. university, 2010. 274 p.
- [2] Polyak B.T., Khlebnikov M.V. New criteria for tuning PID controllers //Automation and telemetry. 2022. No. 11, pp. 62–82.
- [3] Bobyr M.V., Milostnaya N.A., Nolivos K.A. Combination of fuzzy-digital filter and PID controller in the problem of thermoelement control //Mechatronics, automation, control. 2022. Vol. 23. No. 9, pp. 473–480.
- [4] Baranov O.V. Algorithm for tuning a stabilizing PID controller of a quadcopter // Bulletin of higher educational institutions. Instrument engineering. 2021. Vol. 64. No. 10, pp. 829–838.
- [5] Pshikhopov V. Kh. Medvedev M. Yu. Control of moving objects in certain and uncertain environments. Moscow: Nauka, 2011. 350 p.
- [6] Petrova Yu. S., Amelin S.A. Method for developing an adaptive controller in the superheater control system // New technologies in the educational process and production. 2023, pp. 485–486.
- [7] Voronezhskaya E.E., Melnikova V.I., Ivashkin E.G. Monoamines as adaptive regulators of development: phenomenon and mechanisms of action // Journal of Higher Nervous Activity named after I. P. Pavlov. 2021. Vol. 71. No. 3, pp. 295–305.
- [8] Khan N.D., Kuznetsov V.E., Vyng K.N. Synthesis of an adaptive controller to improve the quality of steering drive movement under external load // International Scientific Conference on Control Problems in Technical Systems. – Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Saint Petersburg State Electrotechnical University LETI named after V.I. Ulyanov (Lenin), 2021. Vol. 1, pp. 341–345.
- [9] Medvedev A.V. Fundamentals of the Theory of Nonparametric Systems. Identification, Control, Decision Making: monograph. Siberian State University named after M.F. Reshetnev. Krasnoyarsk, 2018. 732 p.
- [10] Bushueva N.S., Kozyr B. Yu., Zaprivoda A.A. Multi-Level Hybrid Control of Infrastructure Programs // Scientific Journal of Astana IT University. 2020. No. 2, pp. 71–85.
- [11] Babilua P.K., Nadaraya E.A. On One Nonparametric Estimate of the Poisson Regression Function // Probability Theory and Its Applications. 2024. Vol. 69. No. 2, pp. 218–232.
- [12] Orlov A.I. Probabilistic-statistical models of correlation and regression // Polythematic online electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University. 2020. No. 160, pp. 130–162.

- [13] Lapko A. V., Lapko V. A. Unconventional method for selecting the coefficients of fuzziness of kernel functions in nonparametric regression // Measuring equipment. 2023. No. 2, pp. 3–7.
- [14] Simakhin V. A. et al. Nonparametric identification algorithms in problems of acoustic sounding of the atmosphere. 2021.
- [15] Yakovenko P. G. Synthesis of optimal controls for moving objects during transient processes // Bulletin of the Southern Federal University. Technical sciences. 2008. No. 12.
- [16] Zhang E. A., Kempf D. A. Modification of a nonparametric algorithm for modeling and dual control of multidimensional processes under uncertainty // Bulletin of the Voronezh State Technical University. 2020. Vol. 16. No. 3, pp. 7–13.
- [17] Raskina A. V. et al. Dual control of an unstable linear dynamic object using stabilization algorithms // Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region. 2021. No. 9, pp. 30–33.

Сведения об авторах

Михов Евгений Дмитриевич – доцент кафедры РЭБ СФУ, канд. техн. наук. Окончил Сибирский федеральный университет в 2014 году. Область научных интересов: математическое моделирование, агентные системы, системный анализ.

Караванов Александр Владимирович – преподаватель кафедры ОВП СФУ. Окончил Сибирский федеральный университет в 2014 году. Область научных интересов: непараметрическая оценка функции регрессии, восстановление пропусков в выборке наблюдений, системный анализ, непараметрические алгоритмы классификации.

ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОГРИДНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК НА ПРОЧНОСТЬ, УСТОЙЧИВОСТЬ И ЖЕСТКОСТЬ ПРИ КРУЧЕНИИ

Л. М. Ковальчук✉, Т. В. Бурнышева

Новосибирский государственный технический университет
г. Новосибирск, Российская Федерация

В статье рассматриваются анизогридные сетчатые оболочечные конструкции из композиционных материалов. Цель работы – исследовать анизогридные оболочки на прочность, устойчивость и жесткость при кручении. На основе разработанной параметрической конечно-элементной модели исходной конструкции проводился многофакторный вычислительный эксперимент. Построение моделей проводилось в программном комплексе ANSYS. Рассматривались два подхода к моделированию: построение оболочки последовательным заданием семейств ребер и выделение структурного элемента оболочки с последующим копированием его по окружности. Выбран наименее трудоемкий и ресурсоемкий подход для персонального компьютера. Анализ напряженного состояния исходной сетчатой конструкции при кручении показал: спиральные ребра с наклоном влево сжимаются, с наклоном вправо растягиваются, кольцевые ребра работают на растяжение и сжатие. По результатам вычислительного эксперимента были определены зависимости максимальных продольных напряжений в ребрах от изменения угла наклона спирального ребра к образующей, количество пар спиральных ребер и толщина реберной конструкции. Исследовались прочность, устойчивость и жесткость конструкций при кручении с учетом изменения параметров реберной структуры. По итогу исследования выбирались две самые жесткие, прочные и устойчивые конструкции, в которых исключались по два вертикальных структурных элемента. Таким образом, на прочность, устойчивость и жесткость исследовался новый тип анизогридной цилиндрической конструкции, содержащий вертикальные разрезы.

Ключевые слова: анизогридные конструкции, прочность, устойчивость и жесткость, ANSYS, многофакторный вычислительный эксперимент.

Введение

В космической, авиационной и строительной отраслях используются сетчатые оболочки различной конфигурации и назначения [1, 2]. Их применение обусловлено сочетанием высоких прочностных характеристик, малого веса и связности систем [3–5].

Такая конструкция позволяет изменять параметры сетчатой структуры при постоянной массе оболочки.

Композитная сетчатая цилиндрическая оболочка состоит из спиральных ребер с наклоном влево и вправо, кольцевых ребер (рисунок 1), которые изготовлены из высокомодульных однонаправленных композитных материалов с высокой удельной жесткостью и прочностью.

1. Описание исходной конструкции и постановка задачи

Приведена исходная цилиндрическая сетчатая оболочка без обшивки с 72 парами спиральных ребер и углом наклона спирального ребра к образующей 19°. Параметры конструкции указаны в таблице 1.

В таблице 2 представлены геометрические параметры сетчатой структуры исходной конструкции.

Анизогридная оболочка изготовлена из композитного материала из углеродного волокна с характеристиками материала, указанными в таблице 3.

В рабочем состоянии в безвоздушном пространстве кромка нижнего шпангоута жестко крепится к другим силовым элементам изделия, а верхняя испытывает кручение. Примем, что

✉ kovalchuk.2017@stud.nstu.ru

© Ассоциация «ТП «НИСС», 2025

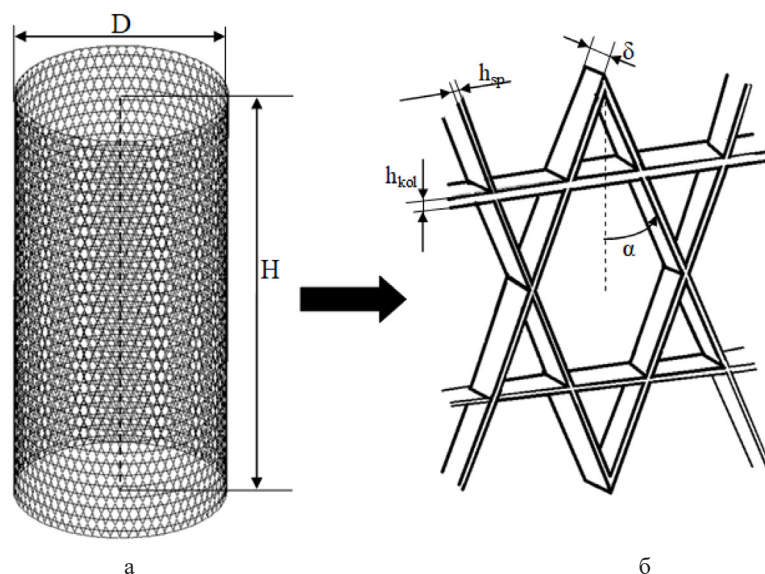


Рисунок 1. Геометрические параметры реберной структуры (H – высота конструкции; D – диаметр; h_{kol} – высота кольцевых ребер; h_{sp} – высота спиральных ребер; b – толщина реберной структуры; α – угол наклона спирального ребра к образующей: а – исходная конструкция; б – вынесенная ромбическая ячейка)

Таблица 1

Параметры исходной конструкции

Высота конструкции, H , м	Диаметр конструкции, D , м	Угол наклона спирального ребра к образующей, α , °	Масса конструкции, M , кг
5.585	2.560	19	165

Таблица 2

Значения геометрических параметров реберной структуры
исходной сетчатой цилиндрической оболочки

	Высота реберной структуры, $h \cdot 10^{-3}$ м	Толщина реберной структуры, $\delta \cdot 10^{-3}$ м
Шпангоуты	30	18
Спиральные ребра	6	14
Кольцевые ребра	3	14

Таблица 3

Параметры исходной конструкции

E , ГПа	ν	ρ , кг/м ³
190	0.3	1781

масса сетчатой оболочки постоянна, при этом реберная структура должна удовлетворять требованиям по прочности, устойчивости и жесткости. Изменение значений геометрических и структурных параметров сетки позволяет сгенерировать семейство анизотридных оболочек с фиксированной массой, но различного механизма отклика на прикладываемую нагрузку. В связи с чем целесообразно провести исследование влияния параметров реберной структуры оболочки на прочность, устойчивость и жест-

кость при крутящем моменте, равном 1 тонна-сила на метр.

2. Моделирование анизотридной конструкции в ANSYS Mechanical APDL

Моделирование в программном модуле ANSYS Mechanical APDL проводилось с учетом выбора наименее затратных по времени и памяти ресурсов ПК. Исследовались два подхода к по-

строению дискретных моделей [6]. Рассмотрим эти подходы более подробно.

Первый подход

Первый подход к построению цилиндрической реберной структуры называется последовательным, поскольку заключается в последовательном написании циклов для каждого семейства ребер. Этот подход состоит из трех этапов (рисунок 2).

На первом шаге задаются точки, образованные пересечением спиральных и кольцевых ребер. На втором шаге задаются линии, соединяющие точки первого шага, и для каждого семейства ребер формируется цикл. На рисунке 2 показана блок-схема формирования трех семейств ребер.

Второй подход

Второй подход к моделированию оболочки основан на выделении структурного элемента (рисунок 3а), который впоследствии копируется, образуя сетчатую структуру (рисунок 3б).

Дополнительно вводится понятие плотности реберной структуры. Под плотностью реберной структуры понимается отношение площади поверхности анизотридной оболочки к площади поверхности сплошной цилиндрической оболочки.

Для определения эффективности приведенных выше подходов построения анизотридных сеток был проведен анализ времени, затрачиваемого персональной ЭВМ на построение конечно-элементных сетчатых оболочечных конструкций различной плотности. На рисунке 4 приведе-

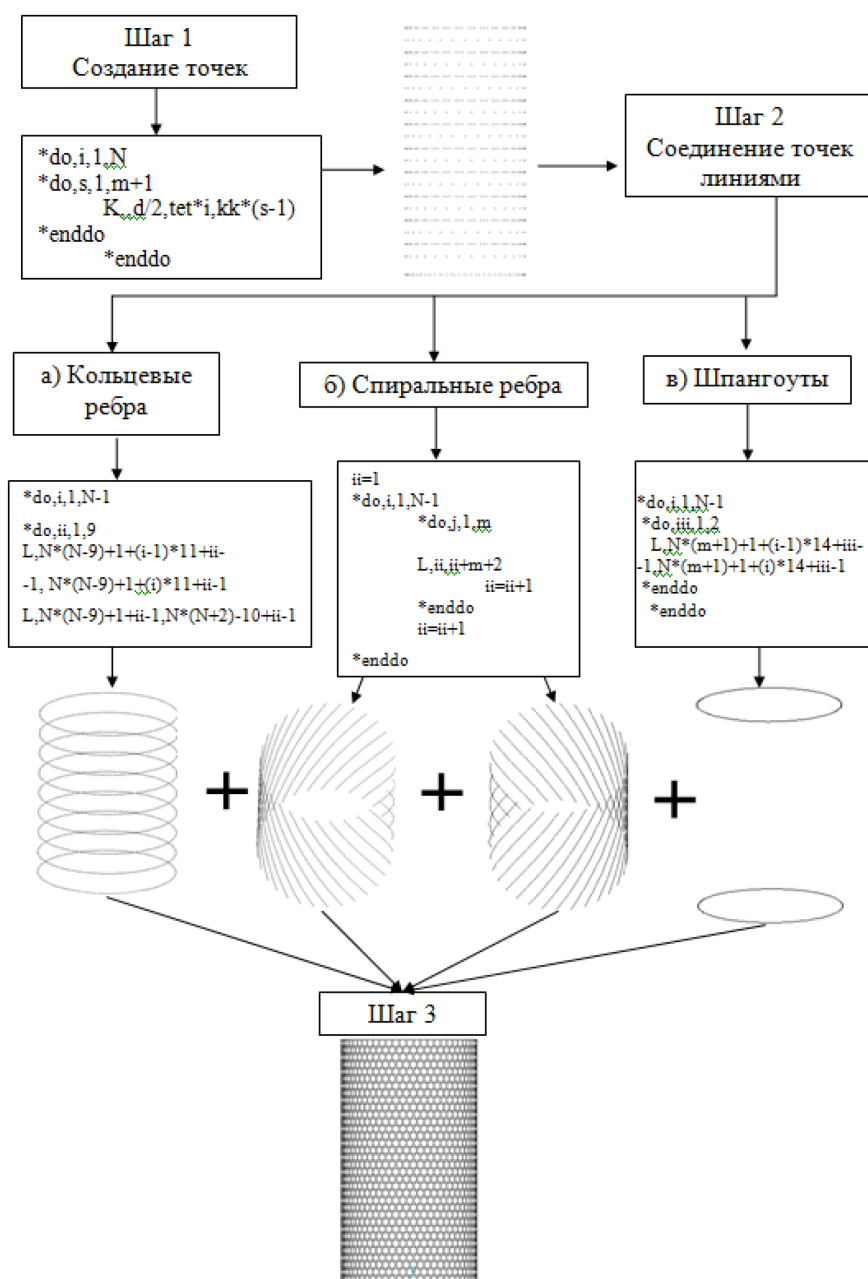
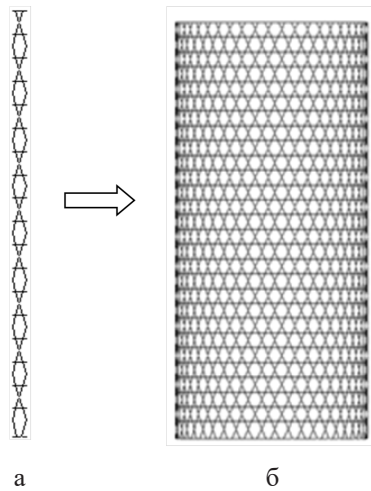


Рисунок 2. Блок-схема построения сетчатой оболочки последовательным заданием семейств ребер



Функции из макроса

```
*do,i,1,2
*do,s,1,m+1
K,,d/2,tet*(i-1),kk*(s-1)
*enddo
*enddo

*do,i,1,m
L,i,i+m+2
L,i+1,i+m+1
*enddo

LGEN,N,all,,,tet,,,1,0
```

Рисунок 3. Схема построения сетчатой оболочки с помощью структурного элемента

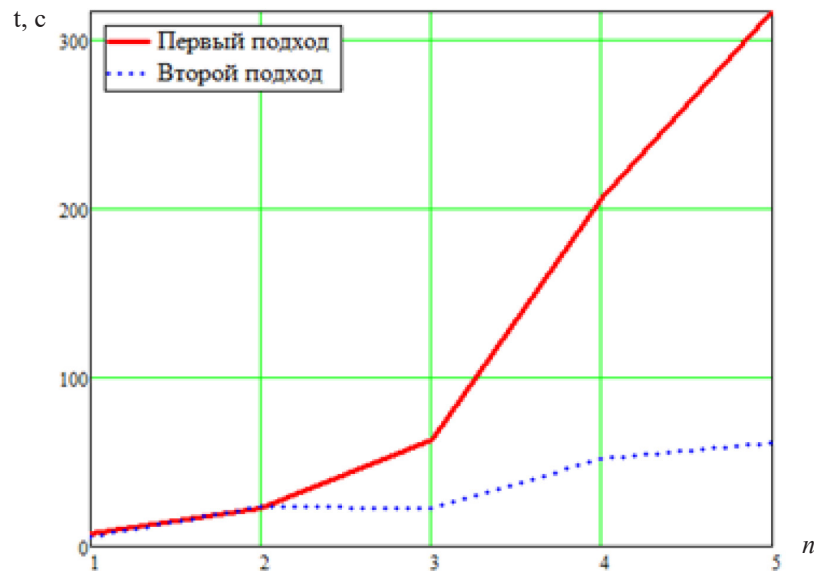


Рисунок 4. Зависимость времени построения t и расчета НДС сетчатых конструкций от плотности реберной структуры оболочек: n – номер конструкции 1–30 пар спиральных ребер; 2–45 пар спиральных ребер; 3–60 пар спиральных ребер; 4–75 пар спиральных ребер; 5–90 пар спиральных ребер

ны зависимости времени построения и расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) оболочки в ANSYS Mechanical APDL от плотности реберной конструкции.

Анализ рисунка 4 позволяет нам сделать следующий вывод: второй подход к построению дискретной модели оболочки является более затратным, чем первый. Время увеличивается со сгущением структуры ребер.

В дальнейшем в исследовании применялся подход с тиражированием структурного элемента при моделировании сетчатых оболочек.

При моделировании конструкции было использовано два типа конечных элементов [7–11].

В реберную структуру анизотридной конструкции закладывался балочный двухузловой элемент с шестью степенями свободы на каждый из узлов BEAM4. Нагрузка прикладывалась к конструкции через мнимый узел, расположенный в центре верхнего шпангоута. После построения параметрической конечно-элементной модели оболочки и определения значений геометрических параметров реберной структуры задаются граничные условия и нагрузки (рисунок 5). К мнимому узлу прикладывается крутящий момент, равный 1 тонна-сила на метр. На нижнем шпангоуте в узлах дискретной модели располагаются сферические шарниры.

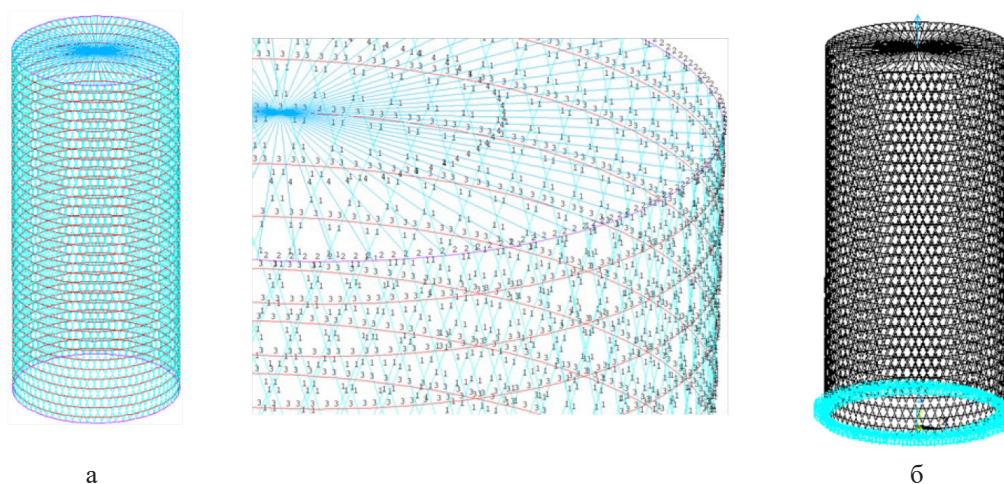


Рисунок 5. Конечно-элементная модель анизотридной оболочки и граничные условия, приложенные к конструкции

3. Исследование исходной конструкции на прочность, устойчивость и жесткость

Прочность исходной конструкции.

Исследовалось НДС [12] цилиндрической сетчатой оболочки при кручении, равному усилию в 1 тонну-силу на метр. Полученные численно поля максимальных продольных напряжений приведены на рисунке 6.

При кручении исходной конструкции в кольцевых ребрах наблюдаются как зоны растяжения, так и зоны сжатия (рисунок 6в); спиральные ребра с наклоном влево сжимаются, с наклоном вправо растягиваются (рисунок 6б).

Устойчивость исходной конструкции. На рисунке 7 приведены пять форм потери устойчивости исходной сетчатой цилиндрической оболочки при кручении [13], рассчитанные в программном комплексе ANSYS.

Приведенные формы потери устойчивости являются волнообразными, изломы ребер не наблюдаются, деформация ребер происходит симметрично. Таким образом, можно предположить, что исходная конструкция способна выдерживать приложенную к ней нагрузку.

Жесткость исходной конструкции

Для исследования жесткости исходной анизотридной конструкции использовались три подхода.

Первый подход. Общеструктурный коэффициент жесткости

Общеструктурный подход основан на положениях теории упругости, механики твердого деформируемого тела и тонкостенных конструкций. Представим конструкцию в виде тонкостенного цилиндра.

Пусть на часть оболочки действует изгибающий момент M . Тогда уравнение равновесия мо-

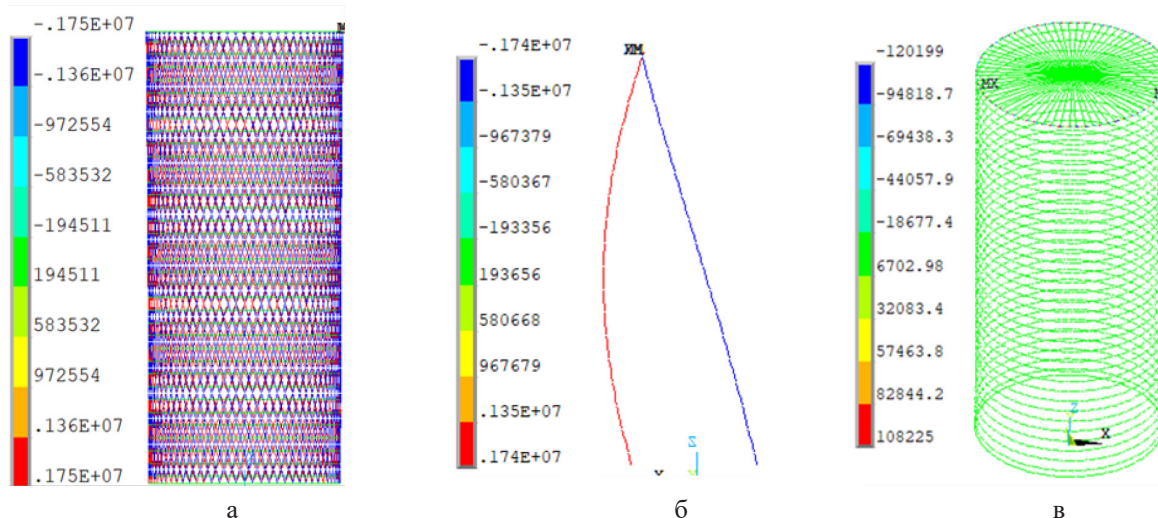


Рисунок 6. НДС исходной конструкции при кручении: а – всей оболочки; б – спиральных ребер; в – кольцевого центрального ребра

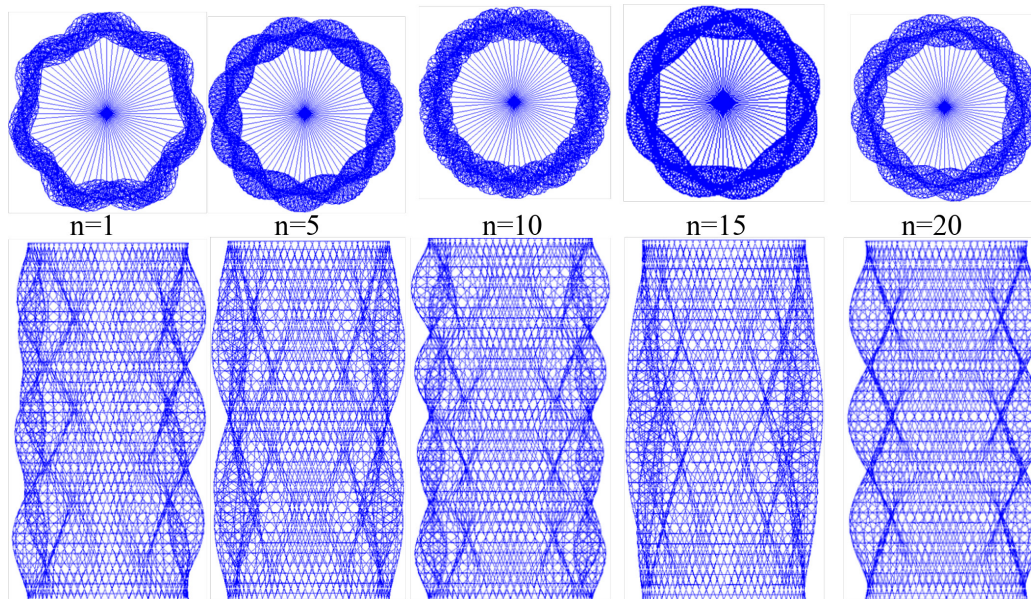


Рисунок 7. Формы потери устойчивости исходной конструкции при кручении:
p – номер формы потери устойчивости

ментов следует из уравнения для функции радиальных напряжений:

$$\sigma = \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{h}{r} \right) \frac{d^2 w}{dx^2}, \quad (1)$$

где ν – коэффициент Пуассона материала; w – вертикальное отклонение оболочки в направлении оси z , h – толщина стенки цилиндра, r – внешний радиус цилиндра. Определяем значение момента:

$$M = - \frac{E}{1-\nu^2} \int \frac{h^2}{r} \frac{d^2 w}{dx^2} dA. \quad (2)$$

Запишем дифференциальный элемент площади поверхности цилиндра $dA = 2\pi r h d\varphi$. Учет формулы для нахождения радиуса кривизны $\frac{d^2 w}{dx^2} = -\frac{1}{r} = \kappa$ позволяет записать формулу (2)

в виде:

$$M = - \frac{E}{1-\nu^2} \int \frac{h^2}{r} \frac{d^2 w}{dx^2} 2\pi r h d\varphi. \quad (3)$$

Запишем выражения зависимости коэффициента жесткости от момента:

$$M = - \frac{E}{1-\nu^2} \int h^3 \frac{1}{r} 2\pi d\varphi. \quad (4)$$

Запишем формулу, описывающую угол поворота φ , который возникает, когда точка перемещается по радиусу R от внутреннего радиуса R_1 к внешнему радиусу R_2 вокруг центра окружности. Формула получается путем определения длины дуги окружности. Если точка перемещается с R_1 на R_2 , то длина дуги будет равна разнице длин дуг, пройденных точкой на радиусах R_2 и R_1 . Угол φ , на который поворачивается точка

при перемещении по дуге длиной L , можно определить, используя соотношение между длиной дуги и углом поворота. Подставляя выражение для длины дуги в это соотношение, разделив обе части на R , мы получаем окончательную формулу (5) для φ . Функцию угла можно записать в виде:

$$\varphi = \frac{MR}{EJ}. \quad (5)$$

Рассмотрим радиус как функцию, зависящую от угла. Подставляем значение момента в формулу и, выполняя преобразования, получаем:

$$k = \frac{Eh^3}{1-\nu^2} \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right). \quad (6)$$

Запишем формулу для нахождения модуля сдвига и выразим модуль упругости, с учетом модуля упругости запишем:

$$k = \frac{2Gh^3}{1-\nu} \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right). \quad (7)$$

Второй подход. Оценка жесткости по семействам ребер

Рассмотрим задачу о кручении оболочки, которое осуществляется вокруг оси z . Перейдем от кручения всей оболочки к кручению элементов по семействам жесткости. Каждое ребро как структурный элемент сетки можно представить в виде набора балок с прямоугольным сечением. Для определения коэффициента жесткости балки используются соотношения из первого подхода.

$$\varphi = \frac{M_z l}{GJ_p}. \quad (8)$$

Поскольку коэффициент жесткости имеет вид $k = M_z/\varphi$, то коэффициент жесткости для каждого семейства ребер может быть рассчитан по следующей формуле:

$$k_i = \frac{GJ_p}{l_i}, \quad (9)$$

где G – модуль сдвига материала; J_p – полярный момент инерции поперечного сечения балки; l_i – длина одной балки семейства ребер.

Третий подход. Оценка жесткости по направлению деформирования

Представляем каждое семейство ребер анизотропной конструкции в виде набора балок. Когда оболочка испытывает крутящий момент, в балках возникает момент сил. Вводим предположение, что структура ребер взаимосвязана, поэтому когда деформируется одно ребро, деформируются и связанные с ним соседние ребра.

Чтобы произвести аналитическую оценку коэффициента жесткости оболочки, запишем формулу момента сил вокруг оси z , используя формулировку закона Гука при кручении $\tau = G\gamma = \rho G \frac{d\varphi}{dt}$:

$$M_z = G \frac{d\varphi}{dt} \int \rho^2 dA. \quad (10)$$

Учтем J_p – полярный момент инерции поперечного сечения балки:

$$M_z = G\theta J_p. \quad (11)$$

Затем вычисляется угол поворота по формуле:

$$\varphi = \int_0^l \frac{M_z}{GJ_p} dz, \quad (12)$$

$$\varphi = \frac{M_z l}{GJ_p}. \quad (13)$$

Поскольку единицей измерения коэффициента жесткости на кручение является Н·м/рад, получаем:

$$k_i = \frac{M_{zi}}{\varphi_i}, i = x, y, z. \quad (14)$$

Коэффициент жесткости ребра может быть рассчитан по другой формуле с учетом перемещений:

$$k_i = \frac{M_{zi}}{u_i}, i = x, y, z. \quad (15)$$

4. Исследование прочности, устойчивости и жесткости конструкций с учетом плотности реберной структуры

Проведем многофакторный вычислительный эксперимент. Первым фактором вычислительного эксперимента выступает количество пар спиральных ребер (N), значения которых изменяются от 30 до 90 пар ребер с шагом в 15 пар. Вторым фактором является изменение угла наклона спирального ребра к образующей (α), значение фактора изменяется с 14° до 24° с шагом в 2° . Матрица вычислительного эксперимента приведена на рисунке 8.

Для проведения вычислительного эксперимента необходимо рассчитать толщины реберных структур с учетом значений вариационных параметров и постоянной массы конструкций. Для этого разработан алгоритм расчета толщины сетчатой структуры, который был реализован в математической среде Mathcad 14.

Следующим шагом выступало моделирование сетчатых конструкций с различной плотностью ребер. Результаты моделирования показаны на рисунке 9.

Прочность конструкций

Численно рассчитывалось НДС анизотропных структур [14–17] при кручении. Зависимости максимальных продольных напряжений в ребрах конструкций от факторов приведены на рисунке 10.

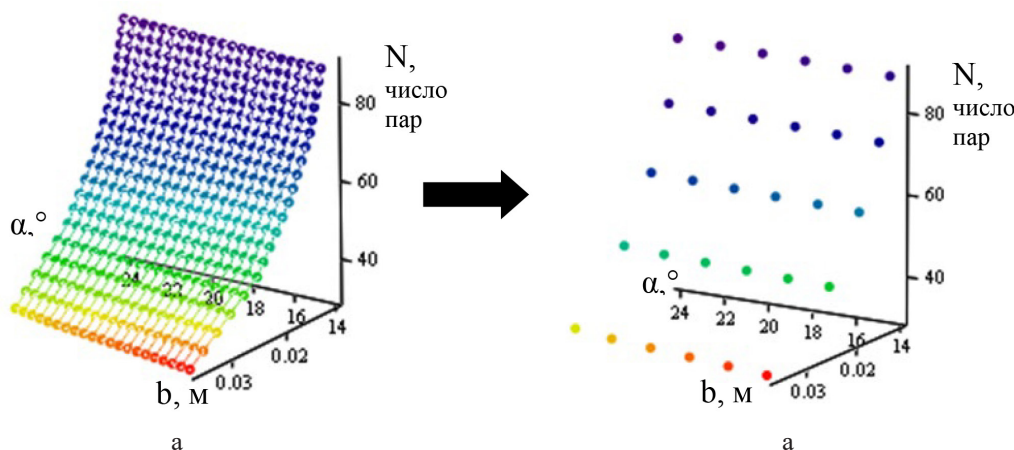


Рисунок 8. Матрица вычислительного эксперимента: а – полная матрица всех возможных вариантов расчета; б – выбранные варианты для вычислительных расчетов

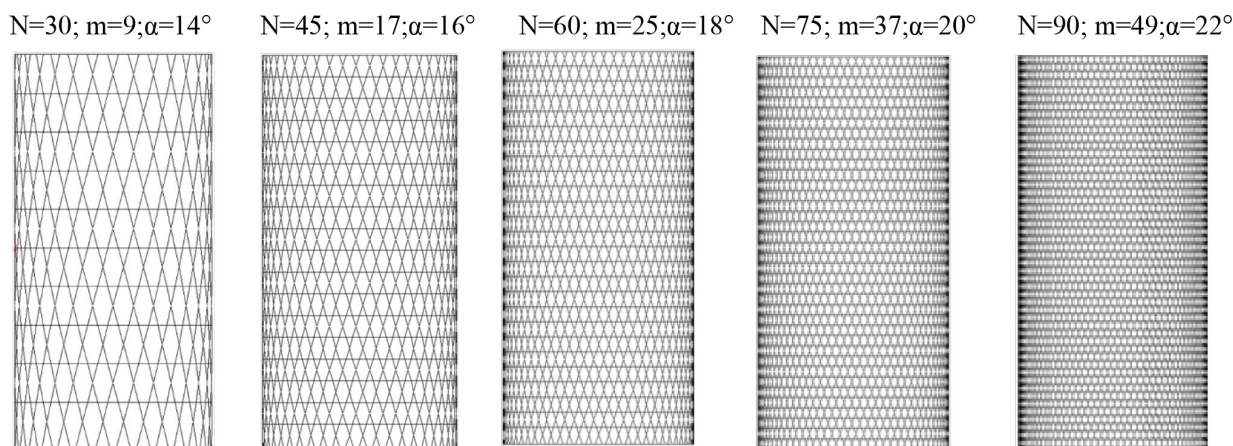


Рисунок 9. Анизотридные структуры многофакторного вычислительного эксперимента:
m – число кольцевых ребер

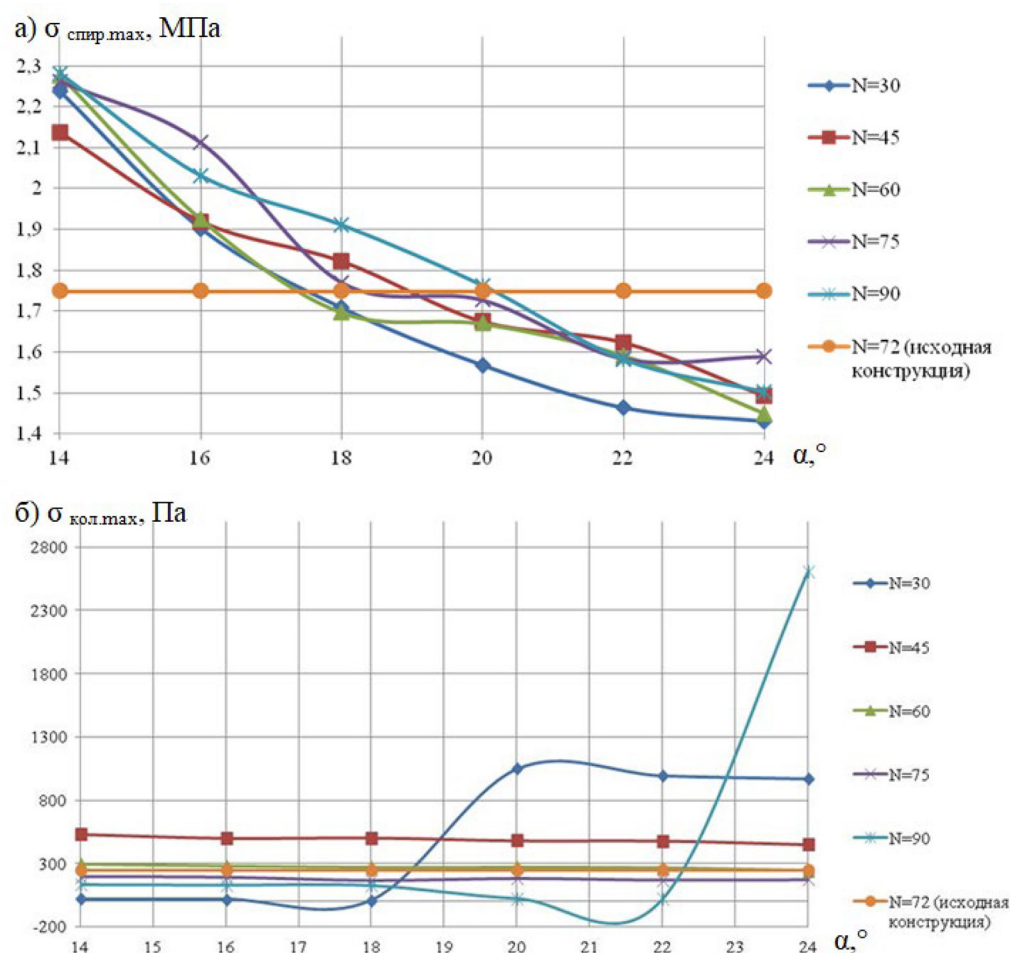


Рисунок 10. Максимальные напряжения (σ_{\max}) в ребрах конструкций:
а – в спиральных ребрах; б – в кольцевых ребрах

Анализ максимальных напряжений σ_{\max} показал, что предел прочности в 750 МПа при кручении конструкции не достигнут. А в спиральных ребрах наблюдается тенденция к снижению значений максимальных напряжений (рисунок 10а). Максимальные продольные напряжения в ребрах нелинейно зависят от угла наклона α . С увеличением плотности сетчатой структуры поверхность

отклика максимальных продольных напряжений в спиральных ребрах оболочек становится гладкой, а в кольцевых ребрах – криволинейной поверхностью [18–20].

Устойчивость конструкций

В конечно-элементном комплексе ANSYS проведены расчеты на устойчивость анизотридных

оболочек различной плотности. К конструкциям была приложена нагрузка в виде крутящего момента, равного 1 Н·м.

По результатам расчета определены значения критических моментов и форма потери устойчивости оболочек. На рисунке 11 представлены формы потери устойчивости оболочек различной плотности.

Следует отметить, что анизотридные структуры с номерами от 3 до 18 и 21, 23, 24 более устойчивы, чем исходная оболочка.

Жесткость конструкций

Исследование жесткости проводилось для анизотридных конструкций различной плотности реберной структуры с использованием трех

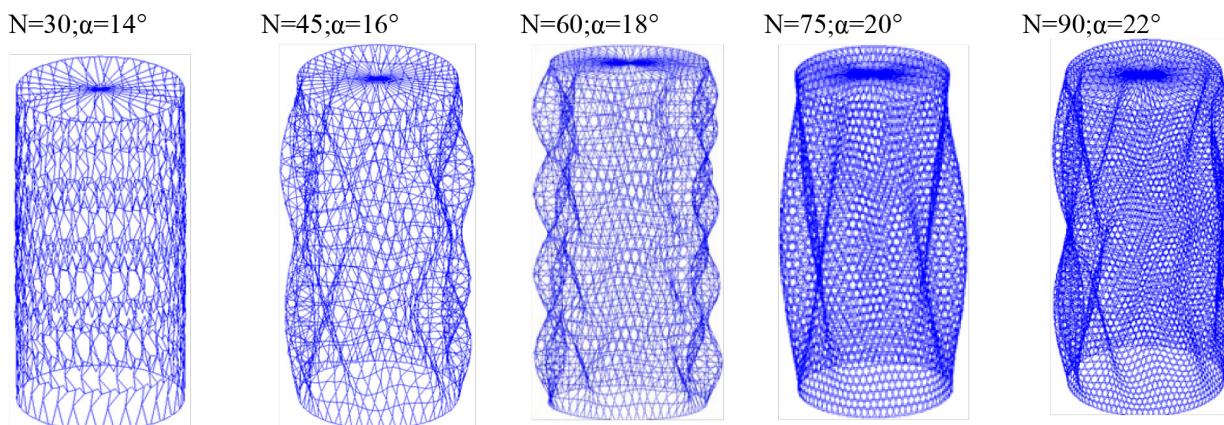


Рисунок 11. Первые формы потери устойчивости анизотридных структур с различной плотностью ребер

Анализ форм потери устойчивости (рисунок 11) позволяет сделать вывод, что конструкции с 30 парами спиральных ребер не выдерживают приложенной к ним нагрузки. С увеличением плотности реберной структуры зоны потери устойчивости оболочек локализуются, становясь более выпуклыми. Это связано с тем, что пересечения спиральных ребер с наклонами влево и вправо симметричны. Учитывая, что масса оболочек фиксирована, толщина реберных структур конструкций уменьшается с увеличением плотности.

На рисунке 12 представлена зависимость значений критических моментов ($M_{кр}$) от номера модели сетчатой конструкции. Параметры реберных структур приведены в таблице 4.

На рисунке 12 сплошной линией показано критическое значение исходной конструкции.

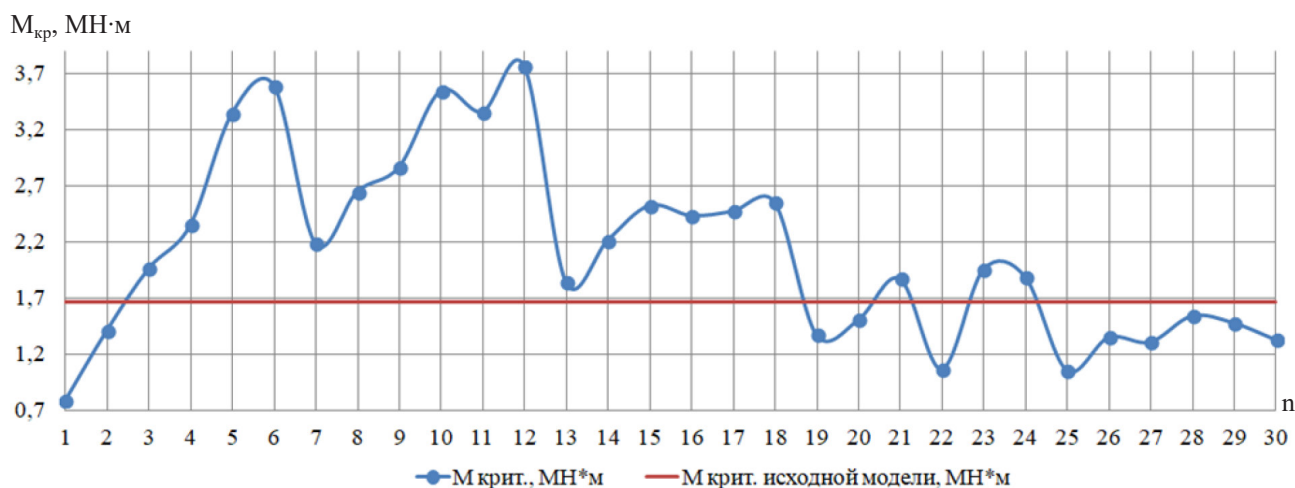


Рисунок 12. Значения критических моментов в зависимости от плотности реберной конструкции

Таблица 4

Изменяемые параметры конструкций в зависимости от номера

№ конструкции	Число спиральных ребер N, пар	Угол спирального ребра к образующей α , °	Толщина реберной структуры b, м
1	30	14	0.0366
2		16	0.0356
3		18	0.0346
4		20	0.0335
5		22	0.0325
6		24	0.0310
7	45	14	0.0242
8		16	0.0237
9		18	0.0231
10		20	0.0226
11		22	0.220
12		24	0.0210
13	60	14	0.0183
14		16	0.0177
15		18	0.0174
16		20	0.0168
17		22	0.0164
18		24	0.0159
19	75	14	0.0143
20		16	0.0139
21		18	0.0135
22		20	0.0132
23		22	0.0127
24		24	0.0124
25	90	14	0.0122
26		16	0.0119
27		18	0.0115
28		20	0.0113
29		22	0.0109
30		24	0.0107

можно говорить об идентичности первого и второго подходов к расчету коэффициента жесткости сетчатых цилиндрических оболочек.

По результатам исследования полученных конструкций с различной плотностью реберной структуры выделяются самые прочные, жесткие и устойчивые конструкции относительно исходной анизотридной оболочки.

Сведем полученные результаты численного расчета в таблицы 5–7, где 0 обозначает сетчатую структуру, у которой значения ниже, чем у исходной конструкции, за 1 приняты значения, которые выше, чем у исходной конструкции. В случае с таблицей 5 за 1 отмечены конструкции, которые не превышают предел прочности.

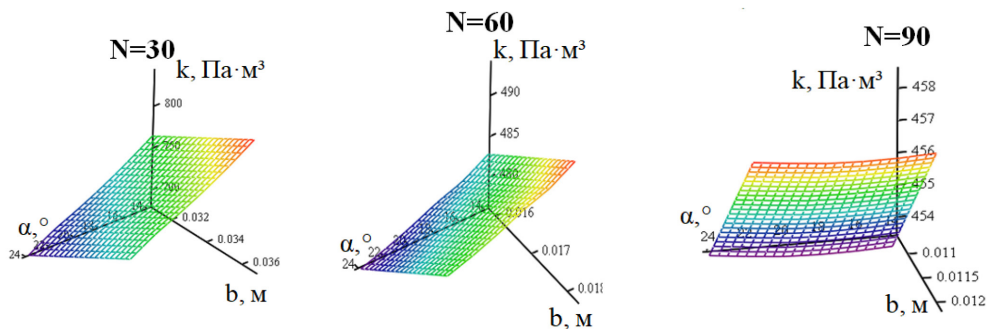
Таблица 5

Оценка напряженного состояния

$\alpha \backslash N$	30	45	60	75	90
14	1	1	1	1	1
16	1	1	1	1	1
18	1	1	1	1	1
20	1	1	1	1	1
22	1	1	1	1	1
24	1	1	1	1	1

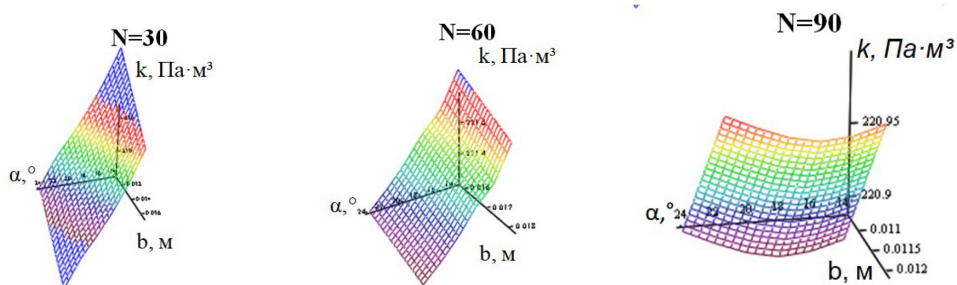
Первый подход

Общеструктурный коэффициент жесткости



Второй подход

Оценка жесткости по семействам ребер



Третий подход

Оценка жесткости по направлению деформирования

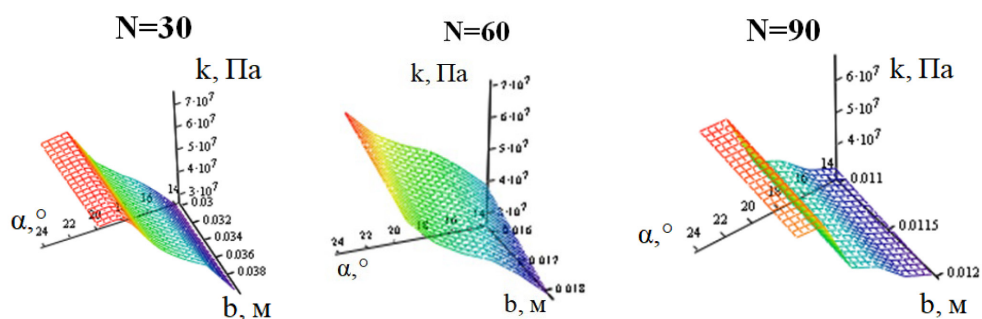


Рисунок 13. Поверхности коэффициента жесткости от угла наклона спиральных ребер (α_i) и толщины реберной структуры (b_i)

Таблица 6

Оценка устойчивости

$\alpha \backslash N$	30	45	60	75	90
14	0	1	1	0	0
16	0	1	1	0	0
18	1	1	1	1	0
20	1	1	1	0	0
22	1	1	1	1	0
24	1	1	1	1	0

Таблица 7

Оценка жесткости

$\alpha \backslash N$	30	45	60	75	90
14	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0
20	0	0	1	0	0
22	0	0	1	0	0
24	0	0	0	0	0

Прочными, устойчивыми и жесткими относительно исходной конструкции оказались оболочки с 60 парами спиральных ребер и углами наклона спирального ребра к образующей в 20 и 22°. Внесем в их конструктив изменения, добавив вертикальный вырез.

5. Анизотридная конструкция с вертикальными вырезами

На рисунке 14 изображена конструкция с вертикальными вырезами.

Для конструкции с вертикальными вырезами вводится ограничение по массе. Масса конструкции с вертикальными вырезами должна быть равна 165 кг. Две части сетчатой структуры связаны между собой замками, на нижнем шпангоуте рас-

полагаются сферические шарниры, а к верхнему шпангоуту прикладывается крутящий момент (рисунок 156).

Моделирование проводилось в ANSYS Mechanical APDL с использованием выделения структурного элемента и последующего его тиражирования подхода.

Исследование на прочность

Напряженно-деформированное состояние конструкции при кручении, равном 1 тонна-сила на метр, показано на рисунке 16.

Определим прочность конструкции:

$$\sigma^{max} \leq [\sigma_{\text{кручение}}],$$

$$5.1 \text{ МПа} < 750 \text{ МПа}.$$

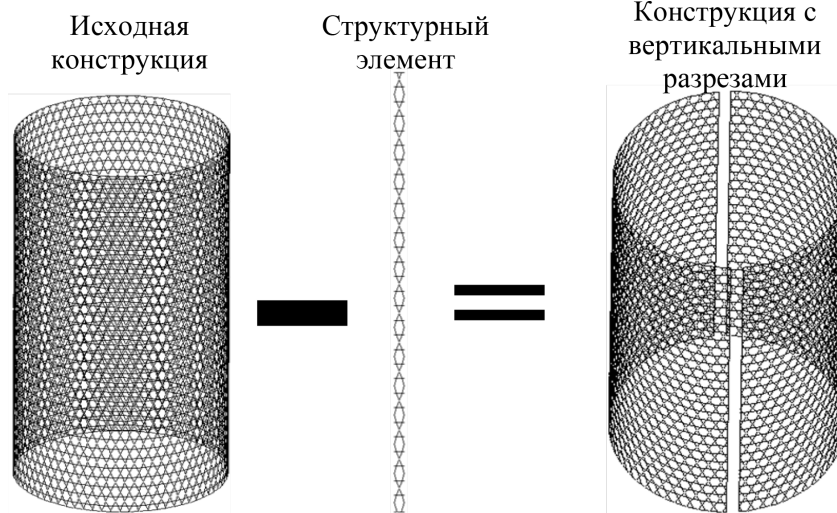


Рисунок 14. Сетчатая конструкция с вертикальными вырезами

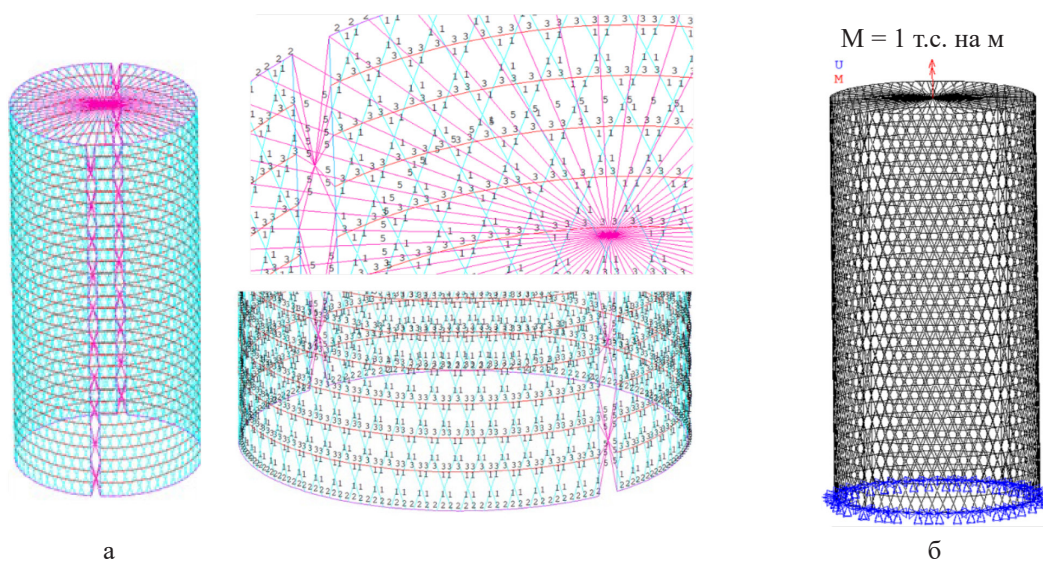


Рисунок 15. Конечно-элементная модель анизотридной оболочки и граничные условия, примененные к конструкции: 1 – спиральные ребра (BEAM4); 2 – шпангоуты (BEAM4); 3 – кольцевые ребра (BEAM4); 4 – продольные ребра (BEAM4); 5 – жесткие связи (MPC 184)

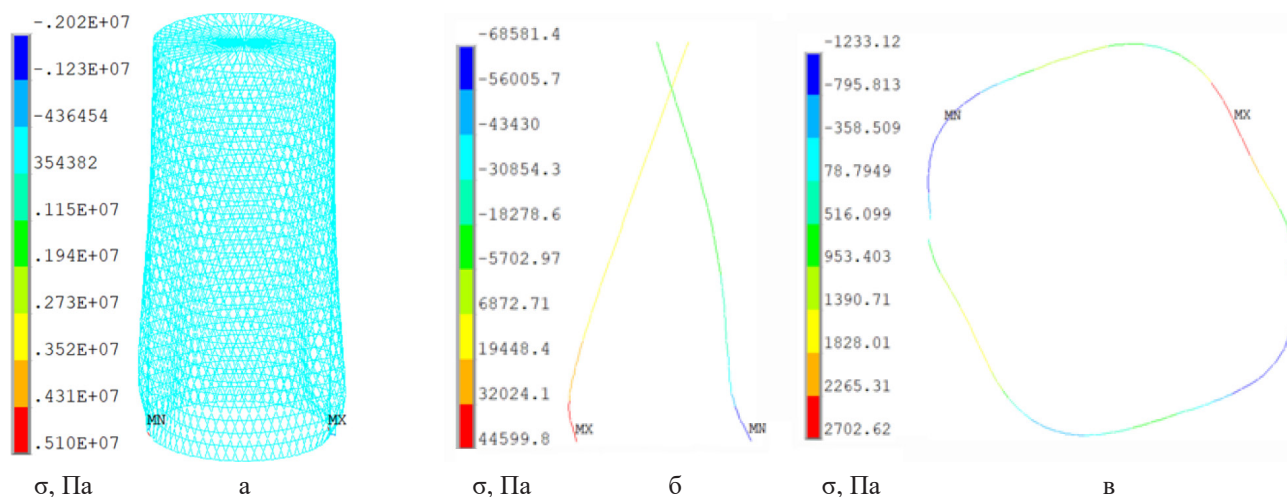


Рисунок 16. Поля напряжений конструкции с вертикальными 60 парами спиральных ребер и углом наклона спирального ребра к образующей 20° при кручении: а – поля напряжений всей конструкции; б – спиральные ребра; в – центральное кольцевое ребро

Исследуем конструкцию с углом наклона 22° на прочность при кручении.

$$\sigma^{max} \leq [\sigma_{\text{кручение}}],$$

$$4.35 \text{ МПа} < 750 \text{ МПа}.$$

Напряжения конструкции не превышают предельных значений, следовательно, она не ломается под крутящим моментом 1 тонна-сила на метр.

Исследование на устойчивость

Исследуем устойчивость конструкций данного типа (рисунки 17, 18) при кручении.

Все критические значения силы и моментов при кручении представим в таблице 8.

Локальные зоны потери устойчивости в конструкции с вертикальными вырезами располагаются вдоль продольных ребер в нижней части

конструкции. Слом продольных ребер наблюдается на первых формах потери устойчивости при кручении, разрушение элементов реберной структуры происходит на высших формах потери устойчивости.

Выводы

В ходе исследования можно сделать следующие выводы.

1. Для анизотридных структур с регулярной сеткой в Ansys Mechanical APDL может быть реализован подход к построению дискретной модели структуры, как с использованием циклов для семейств структурных элементов, так и с выделением структурного элемента при дальнейшем копировании. Второй подход является более эффективным при построении расчетных моделей сетчатых оболочек с большим количеством кон-

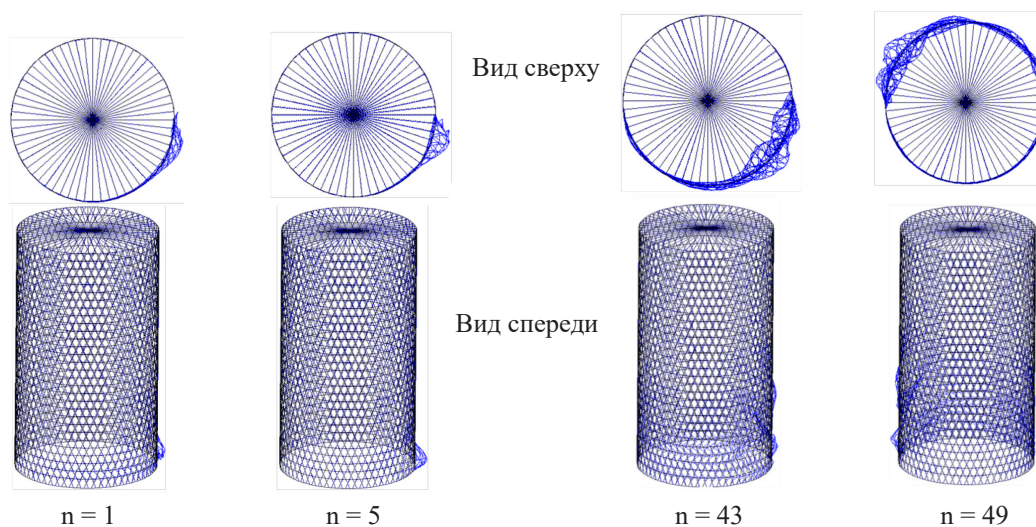


Рисунок 17. Формы потери устойчивости при кручении конструкции с вертикальными разрезами, 60 парами спиральных ребер и углом наклона спирального ребра к образующей 20° (n – номер формы потери устойчивости)

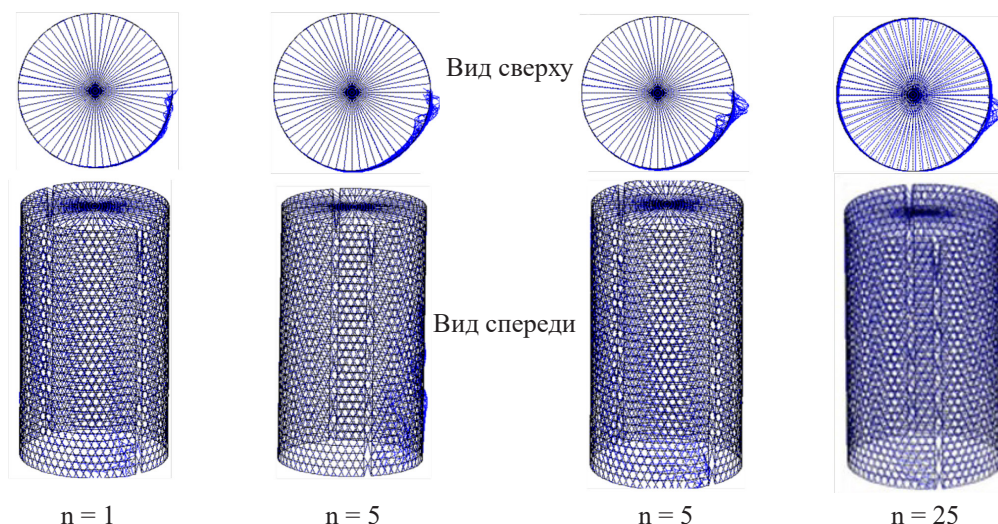


Рисунок 18. Формы потери устойчивости при кручении конструкции с вертикальными разрезами, 60 парами спиральных ребер и углом наклона спирального ребра к образующей 22° (n – номер формы потери устойчивости)

Таблица 8

Таблица критических моментов при кручении конструкции

$M_{\text{крит.}}, \text{Н}\cdot\text{м}$		
№ формы	$N=60; \alpha=20^\circ$	$N=60; \alpha=22^\circ$
1	-209828770	-327297870

структивных элементов и плотностью реберной структуры.

2. При кручении исходной конструкции в кольцевых ребрах наблюдаются как зоны растяжения, так и зоны сжатия; спиральные ребра с наклоном влево сжимаются, с наклоном вправо растягиваются.

Исследование устойчивости исходной конструкции позволяет предположить, что сетчатая структура способна выдерживать приложенную к ней нагрузку. По приведенным формам потери устойчивости изломы ребер не наблюдаются, деформация ребер происходит симметрично.

3. Анализ максимальных напряжений в ребрах конструкций показал, что предел прочности в 750 МПа при кручении конструкции не достигнут. А в спиральных ребрах наблюдается тенденция к снижению значений максимальных напряжений. Максимальные продольные напряжения в ребрах нелинейно зависят от угла наклона α . С увеличением плотности сетчатой структуры поверхность отклика максимальных продольных напряжений в спиральных ребрах оболочек становится гладкой, а в кольцевых ребрах – криволинейной поверхностью.

По полученным значениям критических моментов конструкций можно определить сетчатые структуры, которые способны выдерживать нагрузку большую, чем исходная конструкция. Также наблюдается нелинейность значений кри-

тических моментов с увеличением плотности реберной структуры.

Анализ полученных значений при расчете коэффициентов жесткости поверхностей позволяет выделить следующее: с увеличением плотности реберной структуры поверхности коэффициента жесткости становятся криволинейными. Нелинейность в значения коэффициента жесткости оболочки вносит угол наклона спирального ребра к образующей.

Поверхности отклика коэффициента жесткости оболочки в первом и втором подходах практически идентичны по форме. Таким образом, можно говорить об идентичности первого и второго подходов к расчету коэффициента жесткости сетчатых цилиндрических оболочек.

По результатам исследования полученных конструкций с различной плотностью реберной структуры отбирается самая прочная, жесткая и устойчивая конструкция относительно исходной анизотридной оболочки.

4. Оценивая прочность, жесткость и устойчивость реберных структур относительно исходной анизотридной оболочки, выделяются две самые прочные, жесткие и устойчивые конструкции. В выделенные конструкции вносятся изменения в конструктив оболочек, добавляются вертикальные вырезы. В дальнейшем планируется исследование трансформируемых конструкций в безвоздушном пространстве.

Список литературы

- [1] Васильев В. В. Механика конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1988. 272 с.
- [2] Васильев В. В., Разин А. Ф., Азаров А. В. Композитные сетчатые конструкции – проектирование, расчет и изготовление. М: Инновационное машиностроение, 2023. 488 с.: ил. ISBN 978–5–907523–57–9.
- [3] Жгутов В. М. Компьютерное моделирование прочности и устойчивости упругих ребристых оболочек // Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения: Международная конференция (RELMAS'2008): Труды международной конференции. Санкт-Петербург, 17–20 июля 2008 года, СПбГПУ. СПб., 2008. С. 122–128.
- [4] Васильев В. В., Разин А. Ф. Композитные сетчатые балочные элементы для авиационных конструкций // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. 2006.
- [5] Карпов Владимир Васильевич, Семенов Алексей Александрович, Холод Дарина Вячеславовна. Исследование прочности пологих ортотропных оболочек из углепластика // Труды МАИ. 2014. № 76. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie>
- [6] Ковальчук Л. М. О подходах к построению параметрической дискретной модели сетчатой цилиндрической оболочки в конечно-элементном пакете ANSYS / Л. М. Ковальчук, Т. В. Бурнышева. Текст: электронный // Краевые задачи и математическое моделирование: темат. сб. науч. ст. Новокузнецк: Изд-во КГПИ КемГУ, 2023. С. 52–57. 8 CD-ROMs.
- [7] Петров Г. И., Смирнов А. Н., Халилов С. И. Численное исследование анизотропных конструкций методом конечных элементов // Вестник Московского авиационного института. 2016. № 12(2). С. 128–137.
- [8] Белов В. В., Горбунов А. А., Красильников Н. И. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния анизотропных конструкций // Вестник Московского авиационного института. 2018. № 25(2). С. 103–111.
- [9] Ковальчук Л. М. Исследование напряженного состояния и оценка устойчивости анизотропной цилиндрической оболочки при изменении параметров реберной конструкции при статическом нагружении / Л. М. Ковальчук, Т. В. Бурнышева. DOI 10.1134/S 1063784223700081 // Техническая физика. 2023. № 68(10). С. 328–335.
- [10] Лопатин А. В., Барыльникова Е. А. Конечно-элементное моделирование сетчатых цилиндрических оболочек // Решетневские чтения: материалы Междунар. науч.-практ. конф. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2010. С. 22.
- [11] Логинов М. А., Бендиков А. С., Коваленко И. А. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния анизотропных конструкций в условиях динамических нагрузок // Вестник Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана. Серия: Машиностроение, 2017. № 2. С. 112–123.
- [12] Белов В. В., Горбунов А. А., Красильников Н. И. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния анизотропных конструкций // Вестник Московского авиационного института. 2018. № 25(2). С. 103–111.
- [13] Ковальчук Л. М. Влияние реберной структуры на устойчивость сетчатой цилиндрической оболочки при кручении / Л. М. Ковальчук, Т. В. Бурнышева. // Интеллектуальный потенциал Сибири: сб. науч. тр. 30 регион. науч. студен. конф, Новосибирск, 23–27 мая 2022 г. в 4 ч. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2022. Ч. 4. С. 396–400. ISBN 978–5–7782–4756–7.
- [14] Петров Г. И., Смирнов А. Н., Халилов С. И. Численное исследование анизотропных конструкций методом конечных элементов // Вестник Московского авиационного института. 2016. № 12(2). С. 128–137.
- [15] Логинов М. А., Бендиков А. С., Коваленко И. А. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния анизотропных конструкций в условиях динамических нагрузок // Вестник Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана. Серия: Машиностроение, 2017. № 2. С. 112–123.
- [16] Лопатин А. В., Буров А. А., Хахленкова А. А. Анализ деформирования цилиндрического решетчатого корпуса космического аппарата в зоне крепления бака высокого давления // Серия конференций IOP: Материаловедение и инженерия. Красноярск: Физический институт и издательство IOP Publishing Limited, 2021. С. 1–5.
- [17] Ковальчук Л. М. Исследование напряженного состояния сетчатой композитной оболочки без обшивки при кручении / Л. М. Ковальчук, Т. В. Бурнышева // Проблемы прочности авиационных конструкций и материалов: материалы Всерос. науч.-практ. конф., Новосибирск, 7–10 сент. 2022 г. Новосибирск: СибНИИ им. С. А. Чаплыгина, 2022. С. 37–39. ISBN 978–5–6043216–4–5.
- [18] Ковальчук Л. М. Анализ деформирования ребер сетчатых цилиндрических оболочек при кручении = Analysis of deformation of the edges of mesh cylindrical shells during torsion / Л. М. Ковальчук, Т. В. Бурнышева // Наука. Промышленность. Оборона: тр. 23 Всерос. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию основания конструкторского бюро «Туполев», Новосибирск, 20–22 апр. 2022 г. в 4 т. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2022. Т. 1. С. 43–47. 25 экз. ISBN 978–5–7782–4693–5.

- [19] Ковальчук Л. М. Исследование напряженного состояния и оценка устойчивости анизогридной цилиндрической оболочки при изменении параметров реберной структуры при кручении = Investigation of the stress state and assessment of the stability of an anisogrid cylindrical shell when the parameters of the rib structure change during torsion / Л. М. Ковальчук, Т. В. Бурнышева, С. В. Шайдуров. // Решетневские чтения: материалы 26 междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти ген. конструктора ракетно-косм. систем М. Ф. Решетнева, Красноярск, 9–12 нояб. 2022 г. в 2 ч. Красноярск: Изд-во СибГУ, 2022. Ч. 1. С. 104–106. ISBN 978–5–86433–924–4. 1 CD-ROM.
- [20] Ковальчук Л. М. Конечно-элементный расчёт на прочность и устойчивость анизогридной оболочки при кручении / Л. М. Ковальчук, Т. В. Бурнышева; науч. рук. Т. В. Бурнышева // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр. 16 Всерос. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 5–8 дек. 2022 г. в 11 ч. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2022. Ч. 11. С. 30–34. 100 экз. ISBN 978–5–7782–4872–4

INVESTIGATION OF ANISOGRID CYLINDRICAL SHELLS FOR STRENGTH, STABILITY AND TORSIONAL RIGIDITY

L. M. Kovalchuk, T. V. Burnysheva

*Novosibirsk State Technical University
Novosibirsk, The Russian Federation*

The article discusses anisogrid mesh shell structures made of composite materials. The purpose of the work is to investigate anisogrid shells for strength, stability and torsional stiffness. Based on the developed parametric finite element model of the initial design, a multifactorial computational experiment was conducted. The models were built in the ANSYS software package. Two approaches to modeling were considered: the construction of a shell by sequentially specifying families of edges and the allocation of a structural element of the shell with subsequent copying along the circumference. The least time-consuming and resource-intensive approach for a personal computer has been chosen. The analysis of the stress state of the initial mesh structure during torsion showed: spiral ribs with a slope to the left are compressed, with a slope to the right they stretch, annular ribs work for tension and compression. According to the results of the computational experiment, the dependences of the maximum longitudinal stresses in the ribs on the change in the angle of inclination of the spiral rib to the generatrix, the number of pairs of spiral ribs and the thickness of the rib structure were determined. The strength, stability and rigidity of structures under torsion were studied, taking into account changes in the parameters of the rib structure. As a result of the study, two of the most rigid, durable and stable structures were selected, in which two vertical structural elements were excluded. Thus, a new type of anisogrid cylindrical structure containing vertical sections was studied for strength, stability and rigidity.

Keywords: anisogrid structures, strength, stability and rigidity, ANSYS, multifactorial computational experiment.

References

- [1] Vasiliev V. V. Mechanics of structures made of composite materials [Text] / V. V. Vasiliev. M.: Mashinostroyeniye, 1988. 272 p.
- [2] Vasiliev V. V., Razin A. F., Azarov A. V. Composite mesh structures – design, calculation and manufacture. Moscow: Innovative Mechanical Engineering, 2023. 488 p.: ill. ISBN 978–5–907523–57–9.
- [3] Zhgutov V. M. Computer modeling of strength and stability of elastic ribbed shells // “Scientific and technical problems of forecasting reliability and durability of structures and methods of their solution”: International Conference

- (RELMAS'2008): Proceedings of the international conference. St. Petersburg, July 17–20, 2008, SPbGPU. SPb., 2008. pp. 122–128.
- [4] Vasiliev V. V., Razin A. F. Composite mesh beam elements for aircraft structures // Issues of defense technology. Ser. 15. Composite non-metallic materials in mechanical engineering. 2006.
- [5] Karpov Vladimir Vasilyevich, Semenov Alexey Alexandrovich, Kholod Darina Vyacheslavovna A study of the strength of flat orthotropic shells made of carbon fiber // Proceedings of MAI. 2014. No.76. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie> –
- [6] Kovalchuk L. M. On approaches to the construction of a parametric discrete model of a mesh cylindrical shell in a finite element package ANSYS / L. M. Kovalchuk, T. V. Burnysheva // Boundary value problems and mathematical modeling: topic. collection of scientific articles. Novokuznetsk: Publishing house of KSPI KemGU, 2023. pp. 52–57. 8 CD-ROMs.
- [7] Petrov G. I., Smirnov A. N., Khalilov S. I. Numerical investigation of anisogrid structures by the finite element method // Bulletin of the Moscow Aviation Institute. 2016. № 12(2). pp. 128–137.
- [8] Belov V. V., Gorbunov A. A., Krasilnikov N. I. Numerical modeling of the stress-strain state of anisogrid structures // Bulletin of the Moscow Aviation Institute. 2018. № 25(2). pp. 103–111.
- [9] Kovalchuk L. M. Investigation of the stress state and assessment of the stability of an anisogrid cylindrical shell when changing the parameters of the rib structure under static loading / L. M. Kovalchuk, T. V. Burnysheva. DOI 10.1134/S 1063784223700081 // Technical Physics. 2023. Vol. 68, iss. 10. pp. 328–335.
- [10] Lopatin A. V., Barylnikova E. A. Finite element modeling of mesh cylindrical shells // Reshetnev readings: materials of the International Scientific and Practical Conference / Sib. gos. aerospace. un-T. Krasnoyarsk, 2010. p. 22.
- [11] Loginov M. A., Bendikov A. S., Kovalenko I. A. Numerical modeling of the stress-strain state of anisogrid structures under dynamic loads // Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering. 2017. № 2. pp. 112–123.
- [12] Belov V. V., Gorbunov A. A., Krasilnikov N. I. Numerical modeling of the stress-strain state of anisogrid structures // Bulletin of the Moscow Aviation Institute. 2018. № 25(2). pp. 103–111.
- [13] Kovalchuk L. M. The influence of the rib structure on the stability of the reticulated cylindrical shell during torsion / L. M. Kovalchuk, T. V. Burnysheva // Intellectual potential of Siberia: collection of scientific tr. 30 region. scientific student. Conf, Novosibirsk, May 23–27, 2022: at 4 a.m. Novosibirsk: NSTU Publishing House, 2022. Part 4. pp. 396–400. ISBN 978–5–7782–4756–7.
- [14] Petrov G. I., Smirnov A. N., Khalilov S. I. Numerical investigation of anisogrid structures by the finite element method // Bulletin of the Moscow Aviation Institute. 2016. № 12(2). pp. 128–137.
- [15] Loginov M. A., Bendikov A. S., Kovalenko I. A. Numerical modeling of the stress-strain state of anisogrid structures under dynamic loads // Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering. 2017. № 2. pp. 112–123.
- [16] Lopatin A. V., Burov A. A., Khakhlenkova A. A. Deformation analysis of cylindrical lattice body of spacecraft in zone of high-pressure tank attachment // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2021. pp. 1–5.
- [17] Kovalchuk L. M. Investigation of the stress state of a mesh composite shell without sheathing during torsion / L. M. Kovalchuk, T. V. Burnysheva // Problems of strength of aircraft structures and materials: materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Novosibirsk, September 7–10, 2022 Novosibirsk: SibNIA named after S. A. Chaplygin, 2022. pp. 37–39. ISBN 978–5–6043216–4–5.
- [18] Kovalchuk L. M. Analysis of deformation of the edges of mesh cylindrical shells during torsion = Analysis of deformation of the edges of mesh cylindrical shells during torsion / L. M. Kovalchuk, T. V. Burnysheva // Science. Industry. Defense: tr. 23 All-Russian scientific and Technical conf., dedicated. to the 100th anniversary of the foundation of the Tupolev Design Bureau, Novosibirsk, April 20–22, 2022: in 4 volumes. Novosibirsk: Publishing House of NSTU, 2022. Vol. 1. pp. 43–47. 25 copies. ISBN 978–5–7782–4693–5.
- [19] Kovalchuk L. M. Investigation of the stress state and assessment of the stability of an anisogrid cylindrical shell when the parameters of the rib structure change during torsion = Investigation of the stress state and assessment of the stability of an anisogrid cylindrical shell when the parameters of the rib structure change during torsion / L. M. Kovalchuk, T. V. Burnysheva, S. V. Shaidurov // Reshetnev readings: materials of 26 international scientific and practical conferences, dedicated to the memory of the general designer of rocket-space. M. F. Reshetnev's Systems, Krasnoyarsk, November 9–12, 2022: at 2 a.m. Krasnoyarsk: SibGU Publishing House, 2022. Part 1. pp. 104–106. ISBN 978–5–86433–924–4. 1 CD-ROM.
- [20] Kovalchuk L. M. Finite element calculation for the strength and stability of an anisogrid shell under torsion / L. M. Kovalchuk, T. V. Burnysheva; scientific hand of T. V. Burnysheva // Science. Technologies. Innovations: sat. scientific tr. 16 All-Russian Scientific Conference of Young Scientists, Novosibirsk, 5–8 Dec. 2022: at 11 a.m. Novosibirsk: Publishing House of NSTU, 2022. Part 11. pp. 30–34. 100 copies. ISBN 978–5–7782–4872–4.

Сведения об авторах

Ковальчук Лидия Максимовна – ассистент, лаборант кафедры «Прочность летательных аппаратов», аспирант второго года обучения по специальности 2.5.14. «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов», ФЛА, НГТУ. Область научных интересов: космическая и авиационная техника, механика деформируемого твёрдого тела. Окончила факультет летательных аппаратов Новосибирского государственного технического университета в 2023 году, направление «Прикладная механика», профиль «Динамика и прочность машин», магистр.

Бурнышева Татьяна Витальевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Прочность летательных аппаратов», ФЛА, НГТУ. Окончила математический факультет Кемеровского государственного университета в 1995 году. Область научных интересов: космическая и авиационная техника, механика деформируемого твёрдого тела, численное моделирование, математическое моделирование, расчеты конструкций на прочность.

РАЗРАБОТКА АППАРАТУРЫ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ НА БОРТУ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Т. Г. Орешенко✉, И. В. Назаров, А. С. Чапаева

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

Целью разработки является создание измерительной аппаратуры для мониторинга параметров солнечных батарей на борту малых космических аппаратов формата CubeSat, обеспечивающей точное снятие вольт-амперных характеристик, регистрацию данных о температуре и освещенности, а также их первичную обработку для передачи в центр управления. Цель представленной работы – разработка схемы нагрузочного устройства – определила необходимость постановки и решения основных задач: 1. Разработать электрическую схему измерительной аппаратуры, включая выбор подходящих компонентов и их интеграцию в единую систему. 2. Обеспечить стабилизацию параметров измерений с использованием корректирующих устройств и схем подавления помех. 3. Реализовать систему электропитания, обеспечивающую необходимый уровень напряжения для цифровых и аналоговых элементов при минимизации пульсаций. 4. Выбрать и интегрировать микроконтроллер, способный выполнять функции измерения, управления и передачи данных через бортовую шину CAN.

Ключевые слова: бортовое нагрузочное устройство, структурная схема, микроконтроллер, солнечные панели, микросхема.

Разработка измерительной аппаратуры требует решения нескольких ключевых задач, включая выбор подходящих компонентов, обеспечение устойчивости системы и интеграции с бортовыми устройствами. В основе проекта лежит создание системы для мониторинга параметров солнечных батарей на борту малых космических аппаратов CubeSat.

Для обеспечения устойчивости данной системы требуется провести моделирование устойчивости и рассчитать частотные характеристики схемы, скорректировать ее и разработать схему подключения.

Модель нагрузочного элемента представлена на рисунке 1а, частотные характеристики – на рисунке 1б.

Запас по фазе составляет всего 6 градусов, что указывает на наличие колебательных процессов в системе со значительным перерегулированием. Чтобы улучшить переходный процесс, в модель будет введено интегро-дифференцирующее корректирующее устройство (рисунок 2).

Получены частотные характеристики скорректированной системы (рисунок 3). Как видно из по-

лученных характеристик, запас по фазе увеличился до 123,5 градусов, что означает значительное улучшение параметров устойчивости нагрузочного элемента.

Солнечная батарея, в зависимости от подключенной нагрузки, функционирует либо как источник тока при низкой нагрузке, либо как источник напряжения при высокой. Поэтому нагрузочное устройство должно быть устойчивым к изменениям напряжения в цепи измеряемого источника, обеспечивая поддержание заданной силы тока. Важным условием является минимизация времени регулирования системы, так как процесс сбора данных сопровождается выделением мощности на транзисторе, генерируемой солнечной батареей. Единственным способом снизить общую выделяемую мощность является сокращение времени, необходимого для снятия характеристик. Для этого переходные процессы должны быть максимально быстрыми.

Пример переходного процесса с синусоидальным сигналом возмущения, приложенным к каналу сток-исток МОП-транзистора, при стабилизации силы тока на уровне 500 мА с использованием операционного усилителя, представлен на рисунке 4.

✉ veisver@mail.ru

© Ассоциация «ТП «НИСС», 2025

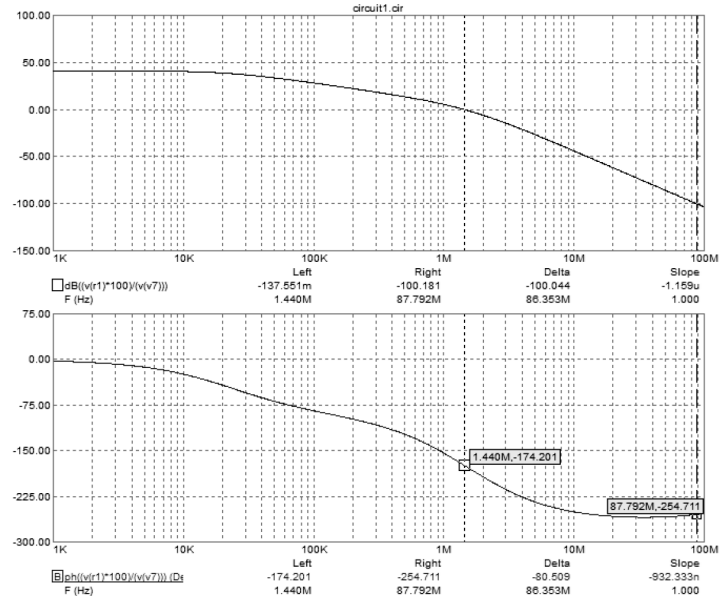
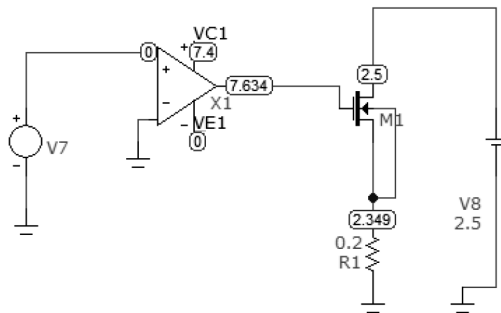


Рисунок 1: а – модель разомкнутого контура нагрузочного элемента в *MicroCAP 12*; б – частотные характеристики нескорректированного нагрузочного элемента

Система устойчива при изменении напряжения в цепи измеряемого источника, переходные процессы завершаются за 29 микросекунд.

Электрическая принципиальная схема скорректированного нагрузочного элемента представлена на рисунке 5.

Измерительная аппаратура должна быть встроена в общую архитектуру *ReshUCube*, включая систему электропитания, шину *CAN* и цифровые компоненты управления. Питание системы осуществляется от аккумуляторов, выдающих напряжение в диапазоне 6–8,4 В, что требует наличия встроенных преобразователей для питания цифровых и аналоговых устройств.

Для организации доступа микроконтроллера в *CAN*-шину необходима специальная микросхема-трансмисмиттер.

Для работы и прошивки микроконтроллера требуется реализовать электрическую схему с соответствующими спецификации компонентами, подключёнными на выводах микроконтроллера. Эти компоненты стабилизируют питание, исключают паразитные микротоки на выводах контроллера, переводят логику устройства в рабочее состояние.

Таким образом, структурная схема устройства приведена на рисунке 6.

Для разработки модуля управления солнечными батареями спутника требуется выбрать микроконтроллер, соответствующий требованиям по периферии, вычислительным возможностям, энергопотреблению и совместимости с системами спутника. Микроконтроллер должен обеспечивать формирование управляющих сигналов, сбор данных с электрической цепи солнечной батареи, первичную обработку данных и их передачу че-

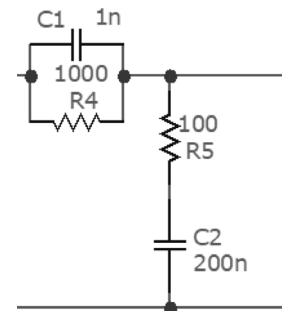


Рисунок 2. Модель корректирующего устройства

рез *CAN*-шину. Необходимы встроенные АЦП, ЦАП, контроллер *CAN*-шины либо возможность подключения внешних устройств через *SPI* или *PC*. Вычислительная мощность должна быть достаточной для базовой обработки данных, желательно наличие аппаратного ускорения математических операций. Дополнительно выбирается микросхема для работы с протоколом *CAN*, соответствующая требованиям по уровням напряжения и взаимодействию с системой электропитания. Завершающим этапом является разработка нагрузочного элемента и измерительной аппаратуры для анализа параметров солнечных панелей. Такой подход обеспечивает энергоэффективность, надежность и функциональность системы.

Таким образом, исходя из проведенного анализа доступных микроконтроллеров, следует выбрать *STM32f103c8t6*. Контроллер с поддержкой *CAN*-шины, 12-битным АЦП с разрешением до 1 миллиона выборок в секунду и встроенным датчиком температуры предоставляет высокую производительность для обработки данных в реальном времени. Два канала *SPI* и два канала *I2C* для под-

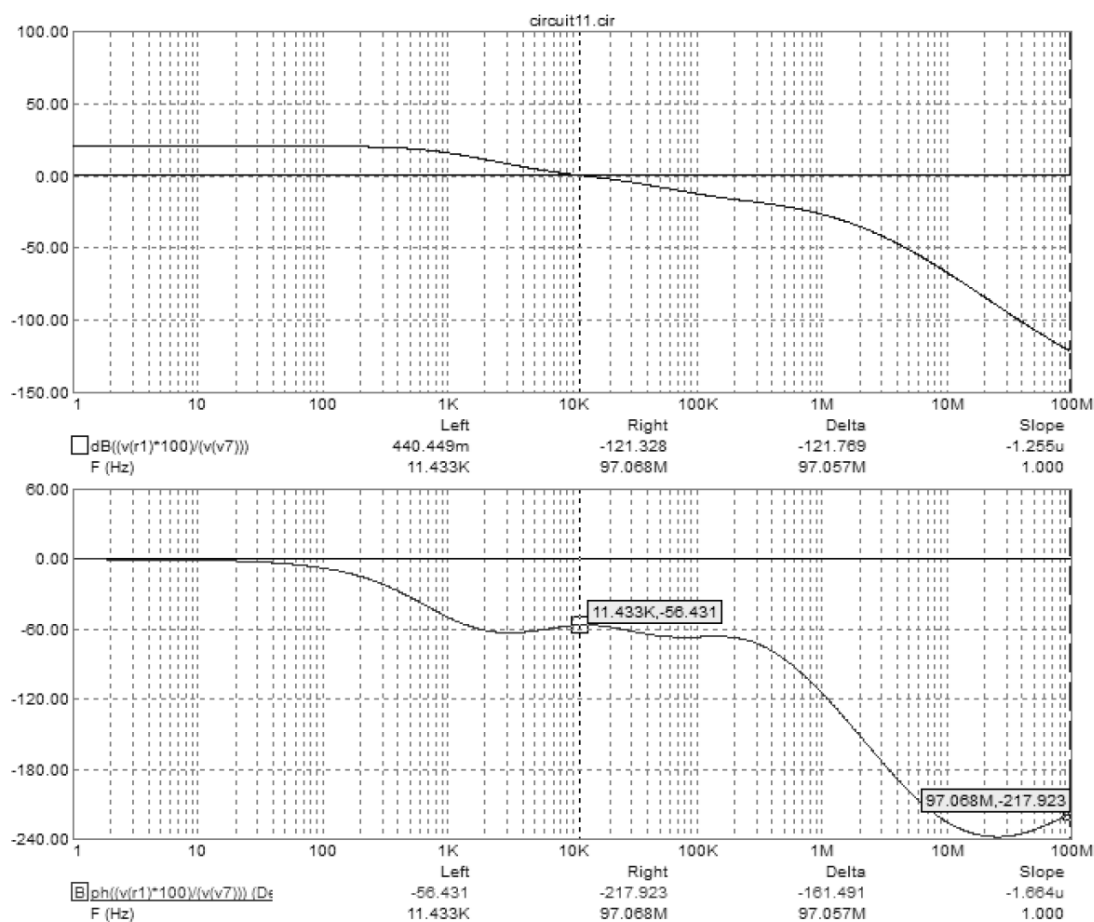


Рисунок 3. Частотные характеристики скорректированного нагрузочного устройства

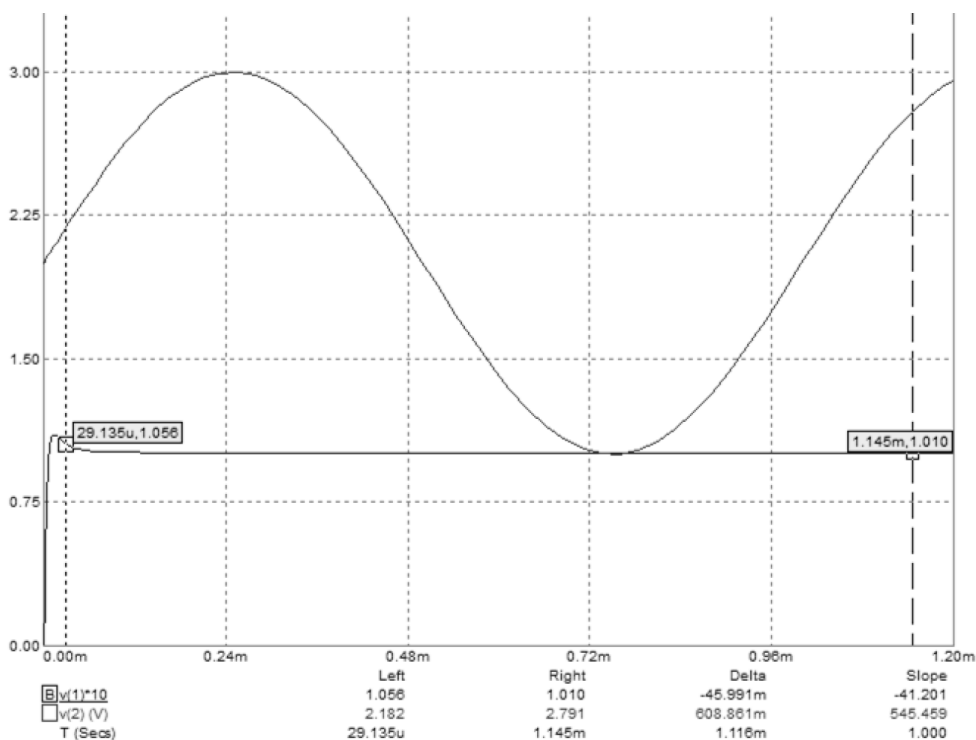


Рисунок 4. Переходные процессы скорректированного нагрузочного элемента

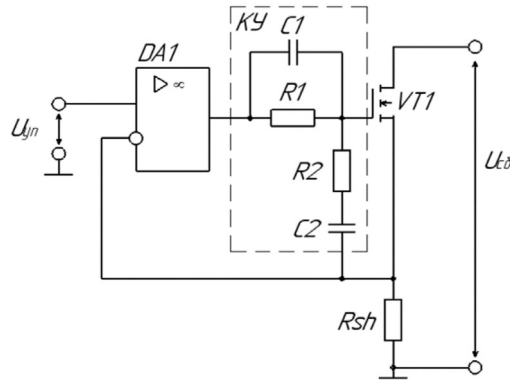


Рисунок 5. Нагрузочный элемент на основе полевого транзистора и операционного усилителя с корректирующим устройством: КУ – корректирующее устройство; R_{sh} – шунт; $U_{уп}$ – управляющий сигнал; $U_{сб}$ – напряжение солнечной батареи

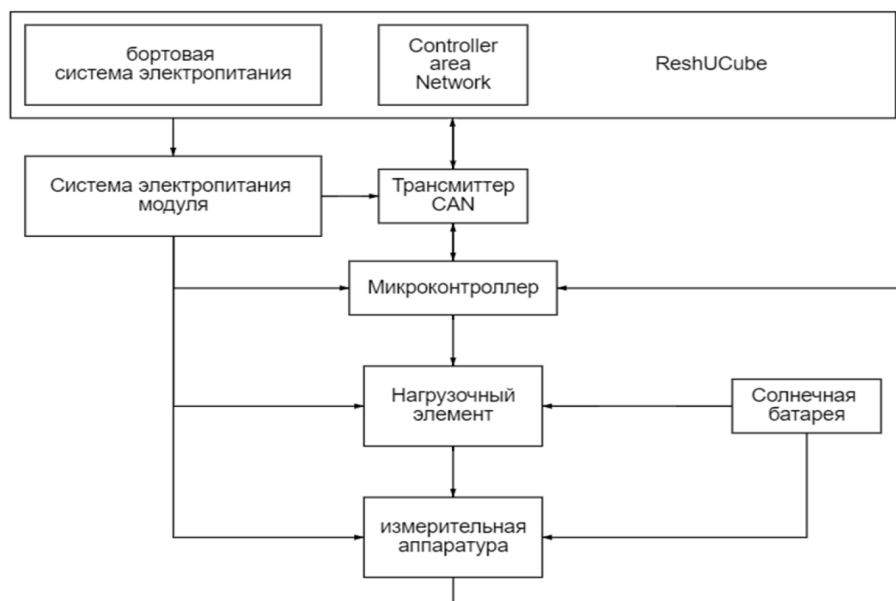


Рисунок 6. Структурная схема нагрузочного устройства

ключения внешних ЦАП обеспечивают гибкость системы. Ядро микроконтроллера, работающее на частоте до 72 МГц, обеспечивает необходимую вычислительную мощность для эффективного управления процессами и обработки данных с минимальными задержками. Также большинство цифровых устройств на *ReshUCube* функционирует именно на микроконтроллерах *STM32*.

Для выбранного микроконтроллера требуется реализовать минимальную схему обвязки. На четырех парах контактов питания необходимо установить конденсаторы для подавления паразитных микротоков и один общий конденсатор с большим значением емкости, для прошивки МК и проведения испытаний устанавливается кнопка, прерывающая питание МК для его перезагрузки.

Так как микроконтроллер не имеет внутреннего модуля ЦАП, следовательно, необходимо подключить внешний модуль, ввиду простоты подключения и управления используем микросхему *MCP4725*.

Для включения микроконтроллера в *CAN*-шину требуется подключить к нему приемопередатчик, предназначенный для передачи данных в протоколе *CAN*. В качестве этого устройства применим микросхему *TJA1042T*.

Для стабильной работы электроники, установленной на модуль нагрузочного устройства, следует обеспечить необходимый уровень питания при минимальных пульсациях в цепи питания. Как определено на схеме подключения трансивера, для его работы, помимо уровня напряжения в 3.3 В, необходима цепь питания с напряжением 5 В для работы в *CAN*-шине *ReshUCube*. Для стабилизации напряжения 3.3 и 5 В применим микросхемы *LM1117-3v3* и *LM1117-5* соответственно.

Для обеспечения стабильности выходного напряжения и улучшения переходных характеристик рекомендуется использовать танталовый конденсатор емкостью не менее 10 мкФ. Для минимизации помех в работе стабилизатора необходимо следовать рекомендациям по трасси-

ровке: токовые трассы должны быть широкими для снижения паразитной индуктивности, а контур обратной связи между V_{OUT} и GND должен быть максимально коротким. Для защиты схемы при замыкании V_{IN} на землю следует подключить внешний диод от V_{OUT} к V_{IN} , чтобы отвести импульсный ток от выходного конденсатора. Диод должен быть размещен вблизи соответствующих выводов микросхемы для повышения эффективности.

Схема нагрузочного элемента со стабилизацией выходного тока полевого транзистора приведена на рисунке 7.

В качестве дифференциального операционного усилителя использован $TL331IDBV$, в качестве

операционных усилителей измерительной аппаратуры использованы прецизионные операционные усилители $AD8571ARZ$.

Смоделированное нагрузочное устройство для малого космического аппарата изображено на рисунке 8.

Таким образом, схема нагрузочного элемента обеспечивает корректное моделирование рабочих режимов батарей, а встроенные системы стабилизации и подавления помех гарантируют надежность измерений в условиях открытого космоса. Программное обеспечение модуля реализует управление процессами измерения, первичную обработку данных и их передачу через шину CAN в бортовую систему спутника.

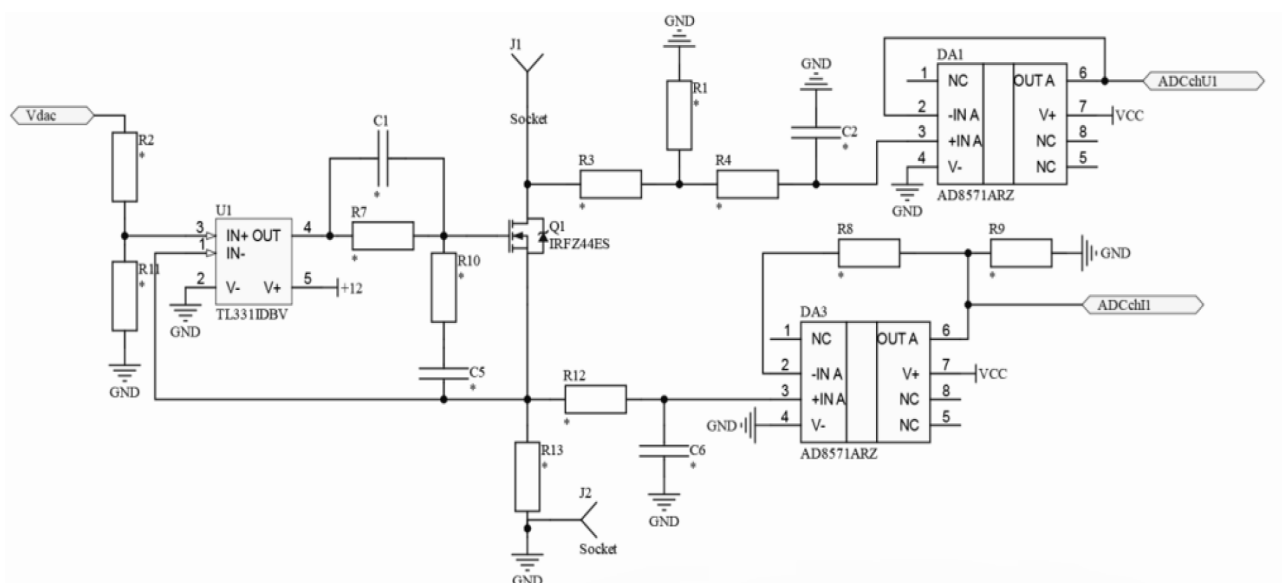


Рисунок 7. Схема нагрузочного элемента с измерительными устройствами

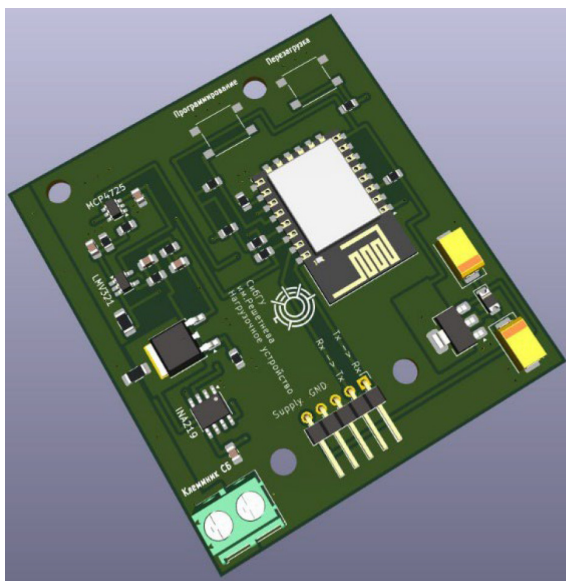


Рисунок 8. Смоделированное нагрузочное устройство

Список литературы

- [1] Повный А. Н. Характеристики солнечных батарей // Электрик Инфо Теория и практика. URL: <https://elektrik.info/main/energy/1550-harakteristiki-solnechnyh-batarey.html> (дата обращения: 13.02.24)
- [2] Основные особенности стандарта CubeSat: Научно-образовательный проект Space-Pi URL: <https://spacepi.space/wiki/article/chto-takoe-cube-sat-kubsat/> (дата обращения: 23.03.24)
- [3] Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: 12-е изд. Т. I. М.: ДМК пресс. 2008. 832 с.
- [4] Колтун М. М. Солнечные элементы // Планета Земля и Вселенная / автор вступительной статьи и примечаний Н. С. Беляев. М.: Наука; М.: БАН, 2017. 192 с.
- [5] Конструкция и варианты комплектации нагрузочных модулей // Электрик-Мастер. URL: <https://elektrik-master.ru/articles/operating-modules-construction-and-complentation.html> (дата обращения: 04.04.24)

DEVELOPMENT OF EQUIPMENT FOR MONITORING THE PARAMETERS OF SOLAR PANELS ON BOARD SMALL SPACECRAFT

T.G. Oreshenko, I.V. Nazarov, A.S. Chapaeva

*Siberian State University of Science and Technology
named after Academician M. F. Reshetnev
Krasnoyarsk, The Russian Federation*

The purpose of the development is to create measuring equipment for monitoring the parameters of solar panels on board small CubeSat spacecraft, providing accurate removal of voltage characteristics, registration of temperature and illumination data, as well as their primary processing for transmission to the control center. The purpose of the presented work is to develop a load device circuit. This goal has determined the need to set and solve the main tasks: 1. To develop an electrical circuit of measuring equipment, including the selection of suitable components and their integration into a single system. 2. To ensure the stabilization of measurement parameters using corrective devices and interference suppression circuits. 3. Implement a power supply system that provides the necessary voltage level for digital and analog elements while minimizing ripples. 4. Select and integrate a microcontroller capable of performing measurement, control and data transmission functions via the on-board CAN bus.

Keywords: on-board load device, block diagram, microcontroller, solar panels, microcircuit.

References

- [1] Povny A. N. Characteristics of solar panels // Electrician Info. Theory and practice. URL: <https://elektrik.info/main/energy/1550-harakteristiki-solnechnyh-batarey.html> (date of reference: 13.02.24)
- [2] The main features of the CubeSat standard: Scientific and educational project Space-Pi. URL: <https://spacepi.space/wiki/article/chto-takoe-cube-sat-kubsat/> (date of request: 23.03.24)
- [3] Titze W., Schenk K. Semiconductor Circuit Engineering: 12th Edition. Vol. I. M.: DMK press. 2008. 832 p.
- [4] Koltun M. M. Solar cells // Planet Earth and the Universe / author of the introductory article and notes N. S. Belyaev. M.: Nauka; M.: BAN, 2017. 192 p.
- [5] Design and configuration options for load modules // Electrician-Master. URL: <https://elektrik-master.ru/articles/operating-modules-construction-and-complentation.html> (date of application: 04.04.24)

Сведения об авторах

Орешенко Татьяна Геннадьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматического управления» Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М. Ф. Решетнева. Область интересов: автоматизация, управление сложными техническими системами, проектирование систем электропитания КА.

Назаров Илья Владимирович – аспирант кафедры «Системы автоматического управления» Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М. Ф. Решетнева. Область интересов: цифровые двойники, автоматизация, системы электропитания КА.

Чапаева Анна Сергеевна – студент кафедры «Системы автоматического управления» Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М. Ф. Решетнева. Область интересов: автоматизация, электроника и электротехника.

КОНСТРУКТИВНЫЕ И СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ НА ОСНОВЕ СЛАБОТОЧНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ

О. И. Ровняков✉, Д. В. Чугунин, К. В. Ануфрейчик

Институт космических исследований РАН
г. Москва, Российская Федерация

Измерение основных характеристик ионосферной плазмы – концентрации, температуры, скорости и её состава – с практической точки зрения представляет собой задачу измерения сверхмалых токов. В статье рассмотрена схемотехника слаботочного входного каскада на основе трансимпедансного усилителя, пригодного для измерения характеристик плазмы с помощью зонда Ленгмюра и ионной ловушки. Обозначены основные проблемы и ограничения, влияющие на динамический диапазон в области очень малых постоянных токов, и указаны пути их решения. На схемотехническом уровне перечислены различные типы входных каскадов интегральных операционных усилителей и их особенности, влияющие на выбор подходящей микросхемы, описаны входные цепи электрометрического усилителя ADA4530–1 и реализованный в нём принцип бутстрепинга (принцип следящей связи). Отмечена важность выбора коммутаторов обратной связи с малой утечкой и продемонстрирована возможность её дальнейшего снижения при помощи бутстрепинга. На конструктивном уровне рассмотрены паразитные явления в изоляционных материалах: проводимость и диэлектрическая абсорбция, предложен материал печатных плат с хорошими характеристиками, описано использование охранных колец и полигонов для радикального снижения утечек монтажа.

Ключевые слова: аппаратура космического аппарата, измерение параметров ионосферной плазмы, зонд Ленгмюра, ионная ловушка, трансимпедансный усилитель, электрометрия, слаботочная электроника.

Введение

Плазма – основное состояние вещества в космическом пространстве. В зависимости от объекта исследования ее характеристики сильно различаются (Солнце, солнечный ветер, магнитосфера Земли и планет, ионосфера Земли) [1]. Особый интерес представляет исследование ионосферы Земли, которая влияет, в частности, на распространение радиоволн, а именно на прохождение сигналов от спутников систем глобальной навигации. Максимум концентрации плазмы в ионосфере приходится на высоту около 300 км, основным сортом ионов является O^+ , концентрация доходит до 10^6 см⁻³, температура составляет около 3000 К. На таких высотах спутники долго существовать не могут из-за торможения об атмосферу, поэтому для исследования верхней ио-

носферы хорошо подходят аппараты, запущенные на солнечно-синхронную орбиту на высоты около 800 км. На такой высоте характеристики плазмы могут находиться в широком диапазоне значений, концентрация от 10^2 до 10^5 см⁻³, температура от 1000 до 10000 К, также сильно может варьироваться процентный состав ионов [2].

Измерение характеристик ионосферной плазмы включает в себя задачи определения концентрации и температуры электронов, а также концентрации, температуры и скорости дрейфа основных ионов: H^+ , He^+ , O^+ . Решение этих задач требует применения научных инструментов трёх типов: зондов Ленгмюра (Langmuir probe), ионных ловушек или цилиндров Фарадея (retarding potential analyzer) и дрейфметров (ion drift meter).

Зонд Ленгмюра предназначен для измерения температуры и концентрации электронов и оценки концентрации ионов плазмы и представляет собой электропроводное тело – т.н. коллектор

✉ rovnyakov@cosmos.ru

© Ассоциация «ТП «НИСС», 2025

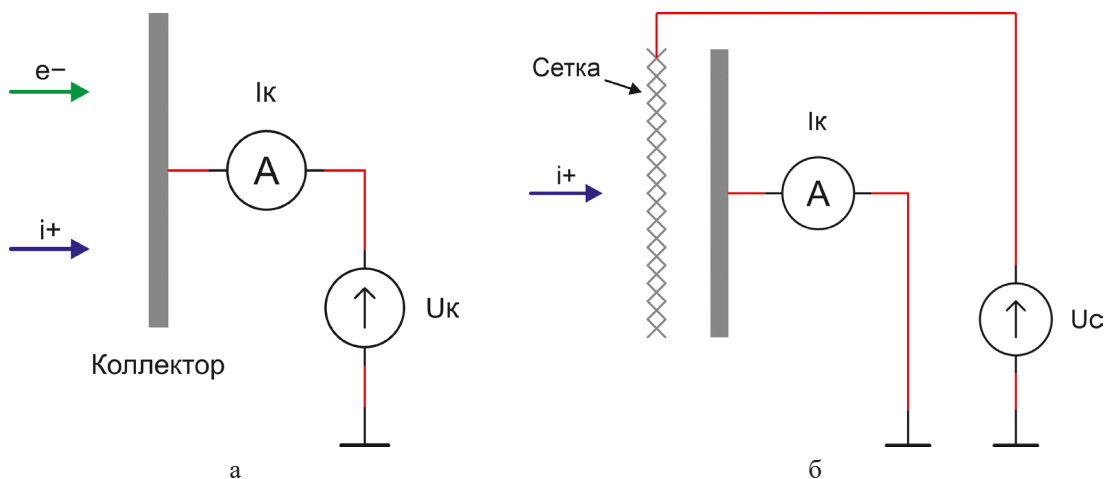


Рисунок 1. Плоский зонд Ленгмюра (а) и ионная ловушка (б)

(в нашем случае – круглая металлическая пластина), соединённый с устройством измерения тока А (рисунок 1а).

Источник напряжения U_K позволяет задавать потенциал коллектора (положительный или отрицательный) относительно измеряемой плазмы и корпуса космического аппарата. Поток электронов e^- и ионов i^+ , набегающих на коллектор, формирует коллекторный ток I_K , представляющий собой сумму электронного и ионного тока и зависящий от коллекторного потенциала: положительно заряженный коллектор притягивает электроны и отталкивает ионы, и наоборот, если коллектор заряжен отрицательно. Компоненты коллекторного тока, в свою очередь, пропорциональны концентрациям, заряду и скорости частиц. Изменяя потенциал коллектора (сweeping) и фиксируя получаемые значения тока, можно построить т.н. зондовую вольт-амперную характеристику. По зондовой ВАХ можно рассчитать

концентрацию и температуру электронов, а также оценить концентрацию ионов, но без разделения на составляющие H^+ , He^+ , O^+ [3]. На рисунке 2 показан пример теоретически рассчитанной зондовой ВАХ плоского зонда Ленгмюра диаметром 36 мм для плазмы со следующими характеристиками: концентрация $n=100 \text{ см}^{-3}$, температура $T=500 \text{ К}$. Содержание основных ионов: H^+ – 35 %, He^+ – 15 %, O^+ – 50 %. Напряжение на коллекторе дано относительно потенциала плазмы.

Основное отличие ионной ловушки (рисунок 1б) от плоского зонда Ленгмюра – перед коллектором устанавливается задерживающая (retarding) сетка, потенциал которой U_C можно менять в полёте, в идеале – от нуля или небольших отрицательных напряжений до нескольких десятков вольт. Потенциал коллектора при этом в простейшем случае может быть равен нулю. Ионная ловушка должна быть направ-

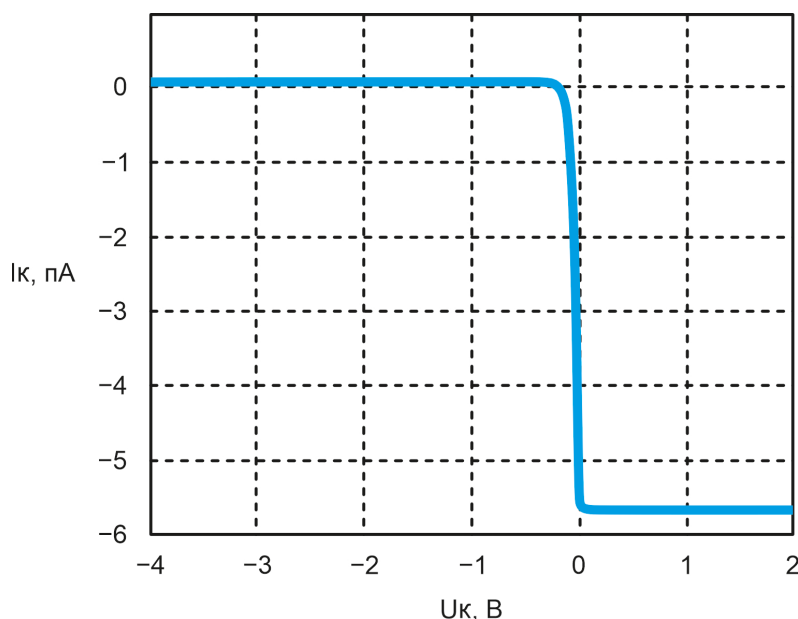


Рисунок 2. Рассчитанная ВАХ зонда Ленгмюра

лена вдоль скорости аппарата. В нулевом приближении можно считать, что плазма набегает на коллектор со скоростью $\sim 7,5$ км/с, что намного больше тепловых скоростей ионов. При нулевом напряжении на сетке практически все ионы свободно достигают коллектора, коллекторный ток при этом максимален. Чем большее положительное напряжение прикладывается к сетке, тем сильнее она замедляет набегающие ионы, и тем меньшее число ионов обладает достаточной энергией, чтобы пройти через сетку и достигнуть коллектора. Наиболее заметный «тормозящий» эффект сетка оказывает на лёгкие ионы водорода H^+ : достаточно всего нескольких вольт, чтобы «водородная» часть тока снизилась на несколько порядков. Для заметного изменения тока, создаваемого тяжёлыми ионами O^+ , напротив, необходимы сравнительно высокие напряжения порядка десятков вольт. Сеточная ВАХ (зависимость тока коллектора от напряжения на сетке) позволяет определить концентрацию, температуру и компоненту скорости основных ионов плазмы. Ионные ловушки, реально используемые в космических экспериментах, имеют более сложное устройство, но работают на том же принципе [4]. На рисунке 3 приведён вариант сеточной характеристики, рассчитанной для плазмы с $n=100$ см $^{-3}$, $T=2000$ К. Площадь коллектора равна 19,6 см 2 .

Задача измерения сверхмалых токов, от единиц микроампер до долей пикоампера, является общей чертой зонда Ленгмюра, ионной ловушки и дрейфметра и главным фактором, определяющим схемотехнические и конструктивные особенности их электроники [4–6]. Дрейфметр имеет существенные отличия от датчиков первых двух

типов, его устройство и принцип действия здесь не приводятся, но вопросы работы со слабыми токами актуальны и для него.

Целью работы является анализ входного каскада на трансимпедансном усилителе как основы слаботочной электроники датчиков плазмы для применения в научной аппаратуре будущих космических миссий, определение его ограничений, недостатков и их причин, выбор элементной базы, конструктивных и схемотехнических решений, сводящих эти недостатки к минимуму.

Трансимпедансный усилитель

Подходящая основа для электроники зонда Ленгмюра и ионной ловушки – источник напряжения, управляемый током (ИНУТ), реализованный в форме трансимпедансного усилителя (рисунок 4) на операционном усилителе (ОУ).

Напряжение неинвертирующего входа U_+ задаётся регулируемым источником опорного напряжения. Операционный усилитель через сопротивление обратной связи R_{OC} поддерживает напряжение инвертирующего входа U_- и, следовательно, напряжение коллектора U_K на таком уровне, что с высокой точностью выполняется равенство $U_K = U_- \approx U_+$. Напряжение на коллекторе зонда Ленгмюра меняется в ходе измерений в пределах нескольких вольт в обе полярности относительно потенциала плазмы. В случае ионной ловушки напряжение может быть фиксированным и даже равным нулю или может периодически подстраиваться в полёте под изменившиеся условия эксперимента. Доступный диапазон напряжений коллектора ограничен напряжением питания, входным и выходным рабочим диапа-

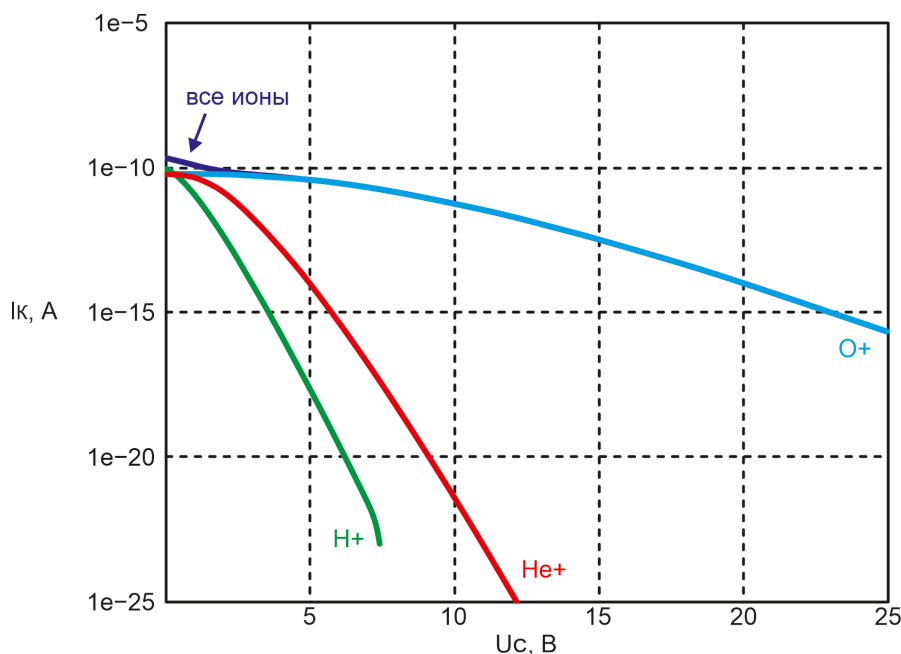


Рисунок 3. Пример теоретической сеточной ВАХ ионной ловушки

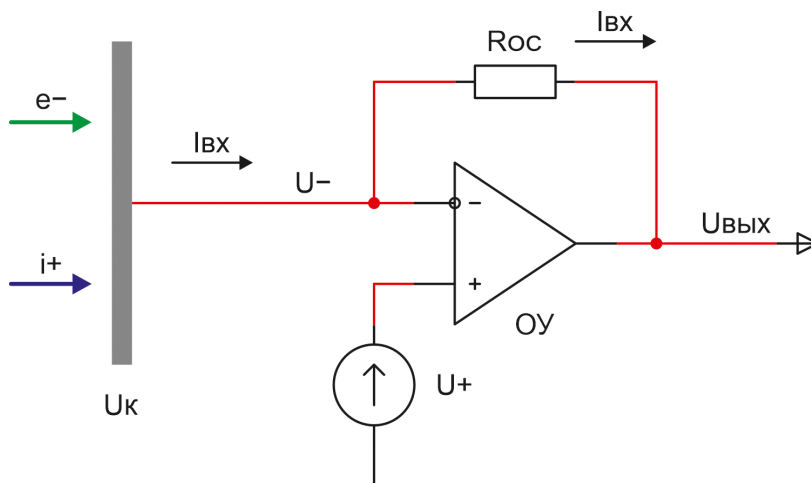


Рисунок 4. Идеальный трансимпедансный усилитель

зоном напряжений ОУ (есть rail-to-rail по входу и выходу или нет).

В идеальном усилителе слабый входной ток $I_{ВХ}$, создаваемый совокупным зарядом набегающих на коллектор частиц, полностью замыкается на сопротивление обратной связи – входные токи идеального ОУ равны нулю, любые утечки отсутствуют. Напряжение на выходе: $U_{ВЫХ} = U_+ - I_{ВХ} \cdot R_{ОС}$. Для реализации широкого динамического диапазона по входному току сопротивление цепи ОС делают переключаемым, от $\sim 10^6$ до $\sim 10^{10}$ Ом.

Реальный трансимпедансный усилитель (рисунок 5) отличается от идеального наличием паразитных токов и напряжений, возникающих из-за неидеальности компонентов (ОУ, коммутаторов) и особенностей конструкции (материал печатной платы, способ монтажа).

Влияние напряжения смещения $U_{ОУ}$ операционного усилителя на точность измерений мо-

жет быть уменьшено выбором ОУ с малым смещением, ручной подстройкой и программной компенсацией. Наибольшее влияние на точность и достижимый динамический диапазон в области сверхмалых токов (пикоамперы, фемтоамперы) оказывают паразитные токи входной цепи: входной ток инвертирующего входа ОУ I_- , утечка коммутаторов I_{OFF} и утечка монтажа I_{PCB} , которые непосредственно вычитаются из слабого входного тока (1, 2).

$$U_{ВЫХ} = U_+ + U_{ОУ} - (I_{ВХ} - I_{УТ}) \cdot R_{ОС1}. \quad (1)$$

$$I_{УТ} = I_- + I_{OFF} + I_{PCB}. \quad (2)$$

Входной ток ОУ

Основным источником входного тока биполярных ОУ является ток базы транзисторов входного каскада, представляющий собой

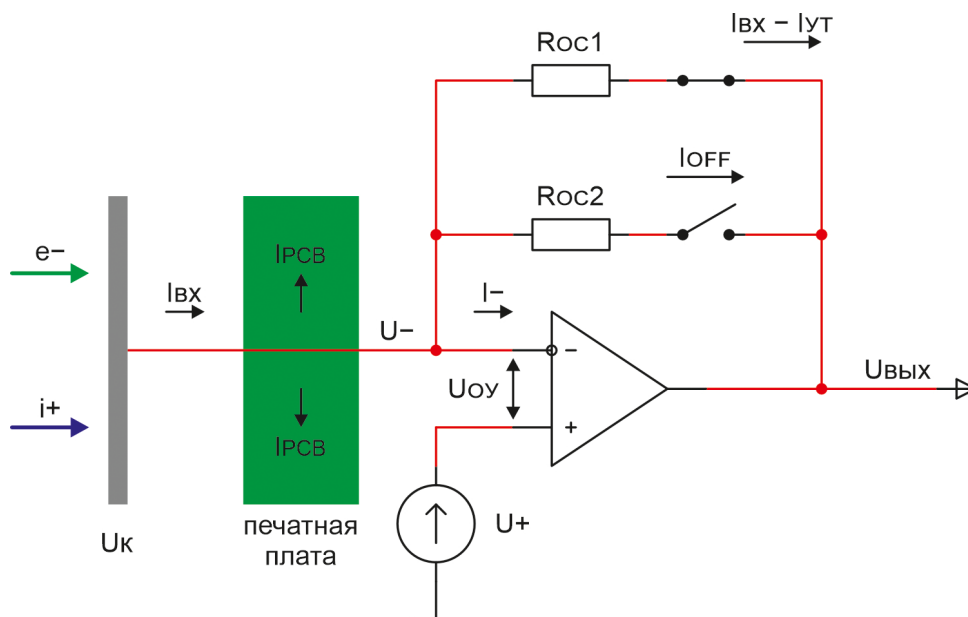


Рисунок 5. Паразитные явления в реальном трансимпедансном усилителе

функцию их коллекторного тока, $I_B = I_K/\beta$, где β – коэффициент передачи транзистора по постоянному току. Первые массовые интегральные ОУ с простым дифференциальным каскадом на входе имели типичное значение входного тока 100 нА и максимальное до 200 нА в нормальных условиях ($\mu A709A$, рисунок 6а, здесь и далее под «нормальными условиями» имеется в виду температура $+25^\circ C$) [7]. В ОУ второго поколения, благодаря улучшению технологического процесса, входные транзисторы имеют повышенный коэффициент передачи β и, как следствие, в несколько раз меньший ток базы: типичное значение 30 нА, максимальное – до 80 нА ($\mu A741A$, LM101A) [7–9]. Применение во входном каскаде супер-бета транзисторов (super-beta, super-gain transistor) с коэффициентами передачи $\beta \geq 2000$ позволяет уменьшить входной ток до единиц наноампер (0,8 нА тип., 2 нА max у LM108) и до десятков пикоампер при использовании супер-бета транзисторов в парах Дарлингтона (25 пА тип., 50 пА max для LM11, рисунок 6б) [8, 9]. Другой способ уменьшения входных токов заключается в их компенсации на кристалле интегральной схемы (рисунок 6в): транзисторы VT1 и VT2 представляют собой пару, согласованную по β . Через них протекает общий коллекторный ток, следовательно, $I_{B2} \approx I_{B1}$. Транзисторы VT4 и VT3 (включён как диод) согласованы по передаточной характеристике (имеют идентичные U_{BE} при одинаковом I_K) и образуют токовое зеркало: $I_{K4} \approx I_{K3} \approx I_{B2} \approx I_{B1}$. Таким образом, $I_- = I_{B1} - I_{K4} \approx I_{B1} - I_{B1} = 0$. Остаточный входной ток для «классического» OP-07A равен 0,7 нА тип., 2 нА max [10, 11]. Более современный ОУ LT1012A, использующий этот принцип, имеет типичное значение входного тока 25 пА и гарантируемый максимум в 100 пА [10, 12].

Ещё меньшие входные токи достижимы с использованием входных каскадов на полевых транзисторах. Первый массовый интегральный ОУ LF155 с входной дифференциальной парой полевых транзисторов с управляющим р-п переходом (JFET) имеет типичное значение входного тока 30 пА в нормальных условиях, тогда как специализированный «электрометрический» OPA129 – в тысячу раз меньше – 30 фА [8–10, 13]. Входной ток таких ОУ по большей части представляет собой обратный ток управляющих р-п переходов и поэтому удваивается с увеличением температуры кристалла примерно на каждые $10^\circ C$. Температура посадочных мест приборов, закреплённых на термостабилизированной плите (ТСП) космического аппарата (КА), обычно гарантируется в диапазоне от -20 до $+40^\circ C$, а при размещении на выносной штанге и смене освещённости температура корпуса прибора может меняться в гораздо более широких пределах – условно, от -150 до $+150^\circ C$, что требует применения для термостабилизации специальных покрытий корпуса, теплоизоляции, радиаторов и/или внутреннего подогрева и т.д., но даже в этом случае крайние рабочие температуры могут отличаться от нормальной на десятки градусов. Это заметно ограничивает возможности применения JFET ОУ в «электрометрических» целях в составе аппаратуры КА: входной ток OPA129 при температуре $+40^\circ C$ возрастает до 100 фА. Наименьшие величины входных токов на сегодняшний день достигнуты в ОУ с входным каскадом на полевых транзисторах с изолированным затвором (МОП, MOSFET): типичный входной ток LMC6041, к примеру, равен 2 фА при $+25^\circ C$ и возрастает всего до 5–6 фА при $+40^\circ C$, т.е. он примерно в 20 раз меньше, чем у OPA129 [10, 14].

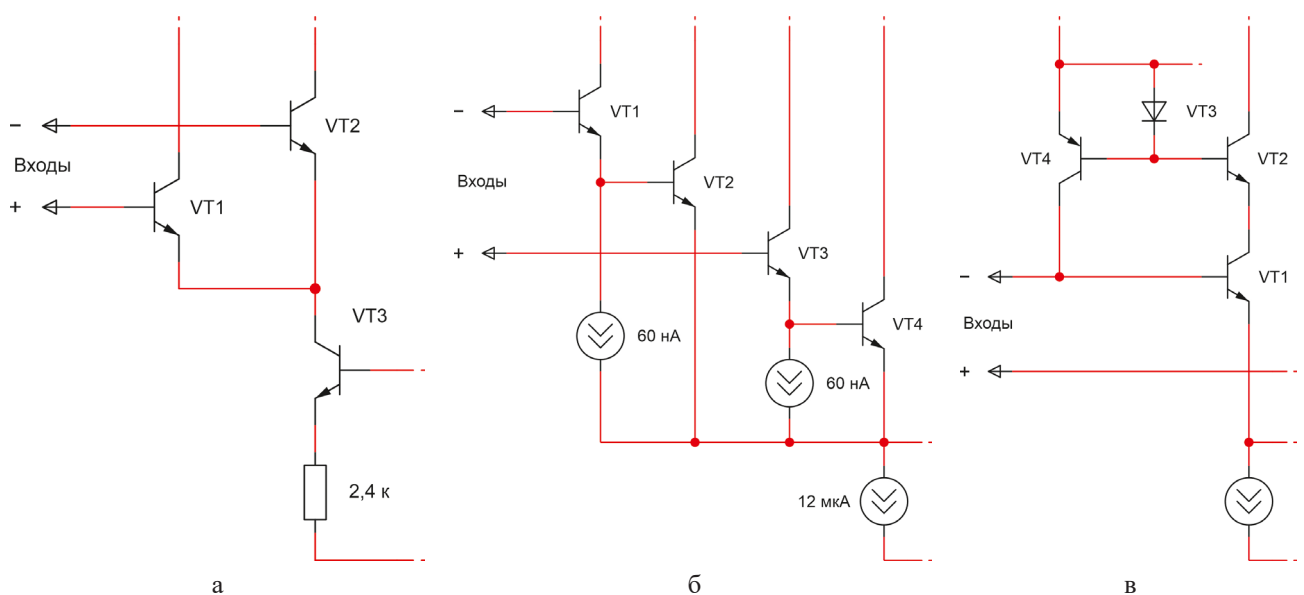


Рисунок 6. Входные каскады операционных усилителей: $\mu A709$ (а); LM11 (б); OP-07 (в)

Доли фемтоампера. Электрометрический ОУ ADA4530–1

В качестве основы для предусилителей зонда Ленгмюра и ионной ловушки был выбран операционный усилитель ADA4530–1 с входным каскадом на МОП-транзисторах, предназначенный для работы со сверхмалыми токами. Типичные значения его входных токов в практическом диапазоне температур от 0 до +70 °С лежат в области десятых долей фемтоампера. При росте температуры свыше +50 °С наблюдается экспоненциальный рост тока, что в целом характерно для ОУ с «полевым» входом (у «биполярного» входа базовые токи транзисторов, наоборот, снижаются с ростом температуры из-за роста β). Гарантируемый производителем предельный уровень в 20 фА в диапазоне температур от –40 до +85 °С обусловлен не реальной статистикой, а невозможностью производственного контроля меньших значений тока на имеющемся оборудовании. Усилитель имеет крайне малое входное смещение ~9 мкВ (50 мкВ max), и его температурный дрейф не более 0,5 мкВ/°С для положительных температур [15].

На рисунке 7 упрощённо показаны входные цепи ADA4530–1. Входной дифференциальный каскад построен на паре МОП-транзисторов VT1 и VT2. Затвор МОП-транзистора физически отделён от канала слоем изолятора – оксида кремния, проводимостью которого в рабочем диапазоне температур микросхемы можно пренебречь. При температурах

выше 60–70 °С, как и в JFET ОУ, наблюдается экспоненциальный рост входного тока, который обусловлен в основном элементами защиты от электростатических разрядов и слишком больших синфазных (VD5, VD6) и дифференциальных (VD1–VD4) входных напряжений [15]. Помимо сверхмалых входных токов вторая важная особенность ADA4530–1, обусловившая его выбор, – встроенный «охранный» буфер (guard buffer) BUF, который сводит к минимуму возможные утечки через защитные диоды, поддерживая на них практически нулевое смещение с помощью следящей обратной связи. Выход буфера также соединён с выводами GRD для защиты от утечек элементов обвязки ОУ, подключения охранных колец и полигонов на печатной плате.

Бутстрепинг для устранения утечек

Следящей связью или бутстрепингом (bootstrapping) называют метод повышения эффективного импеданса цепи с помощью положительной обратной связи. На рисунке 8а показан пример обычной электрической цепи без бутстрепинга. Напряжения в узлах А и В независимы, для простоты можно считать U_B равным нулю. Здесь R_{UT} – сопротивление утечки (например, сопротивление изоляции). Напряжение, приложенное к R_{UT} , создаёт паразитный ток утечки, который вычитается из входного тока (3–5).

$$I_{ВЫХ} = I_{ВХ} - I_{УТ}. \quad (3)$$

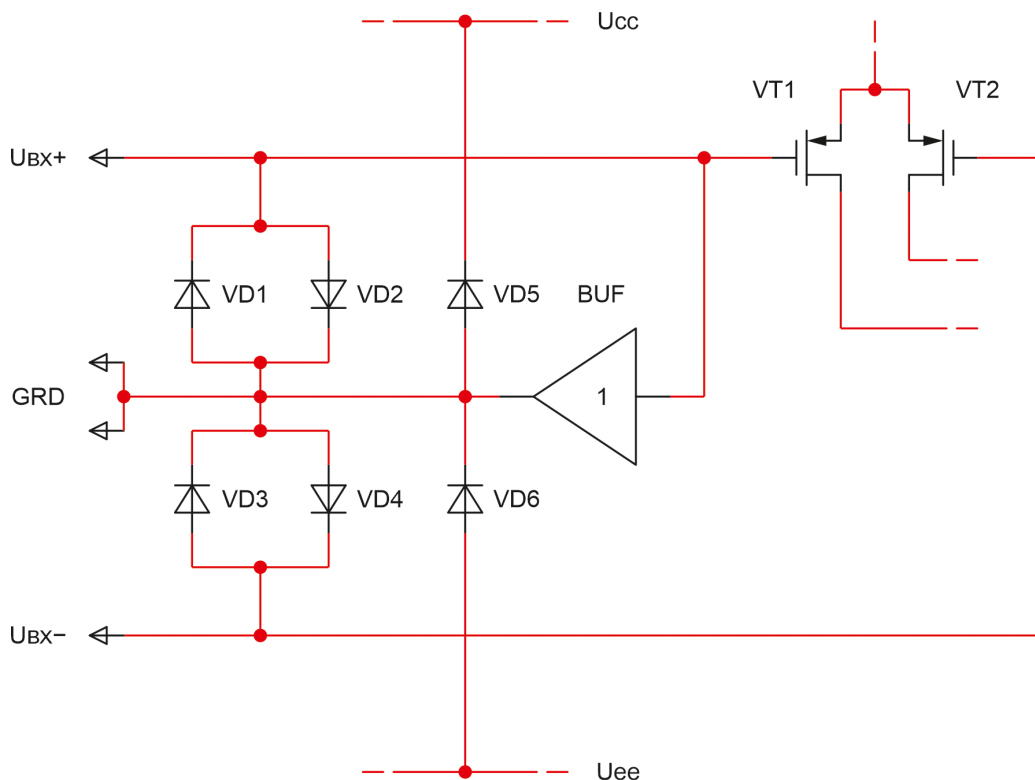


Рисунок 7. Входные цепи электрометрического ОУ ADA4530–1

$$I_{UT} = (U_A - U_B) / R_{UT} \quad (4)$$

$$I_{UT(a)} = U_A / R_{UT} \quad (5)$$

В цепь на рисунке 8б добавлен бутстрепинг на усилителе с единичным усилением – буфере. Вход буфера подключается к цепи, импеданс которой нужно увеличить. Сам буфер выбирается таким, чтобы его напряжение смещения $U_{БУФ}$ было как можно меньше, входной ток оказался пренебрежимо мал в сравнении с током в рассматриваемой цепи, $I_{БУФ} \ll I_{ВХ}$, а коэффициент передачи по напряжению был как можно ближе к единице, $K_{БУФ} \approx 1$. Тогда напряжение на выходе буфера с высокой точностью повторяет входное (6).

$$U_B = K_{БУФ} \cdot (U_A + U_{БУФ}) \approx K_{БУФ} \cdot U_A + U_{БУФ} \quad (6)$$

Возвращаясь к формуле (4), получаем выражение для тока утечки с бутстрепингом (7).

$$I_{UT(б)} = \frac{U_A \cdot (1 - K_{БУФ}) - U_{БУФ}}{R_{UT}} \quad (7)$$

Принимая $U_{БУФ} = 0$ и подставляя разные значения $K_{БУФ}$ в (7), рассмотрим влияние коэффициента передачи буфера на ток утечки по сравнению с величиной $I_{UT(a)}$ (5) в схеме без бутстрепинга (таблица 1).

Как видим, даже посредственный буфер с коэффициентом передачи, заметно отличающимся от единицы, позволяет значительно снизить паразитные утечки в цепи или, иными словами, существенно увеличить эффективное сопротивление участка цепи R_{UT} , вызывающего потери тока. Если в качестве буфера выступает ОУ с собственным усилением α , то коэффициент передачи такого буфера будет равен (8).

$$K_{БУФ} = \alpha / (1 + \alpha) \quad (8)$$

Собственное усиление (при разомкнутой ОС) современных прецизионных ОУ обычно очень

Таблица 1
Влияние коэффициента передачи буфера на подавление тока утечки

$K_{БУФ}$	$I_{UT(б)} / I_{UT(a)}$
0,9	0,1
0,95	0,05
0,99	0,01
0,999	0,001
1	0

велико. Для охранного буфера, встроенного в ADA4530–1, значения параметров α и $K_{БУФ}$ производитель не сообщает, но есть указание на то, что охранный буфер в целом близок по устройству к самому усилителю ADA4530–1, усиление которого на большом сигнале в типичном случае составляет 155 дБ, что в теории позволяет с помощью такого буфера снизить потери тока через R_{UT} более чем на 7 порядков. В таком случае фактором, ограничивающим возможности бутстрепинга, зачастую окажется $U_{БУФ}$ – собственное смещение буфера, которое при комнатной температуре имеет типичное значение 15 мкВ и гарантируемое – не более 100 мкВ [15]. Приложенное к паразитному сопротивлению $R_{UT} = 1$ ГОм, такое смещение создаст $I_{UT} = 15$ фА, поэтому само по себе применение бутстрепинга для «защиты» входных цепей не отменяет строгих требований к остальным компонентам, материалам и качеству монтажа, когда речь идёт о работе с фемтоамперными сигналами.

Входное сопротивление и утечки монтажа. Охранные кольца

Дифференциальное сопротивление $R_{ДИФ}$ (сопротивление между входами) ADA4530–1 очень велико и практически не поддаётся измерению.

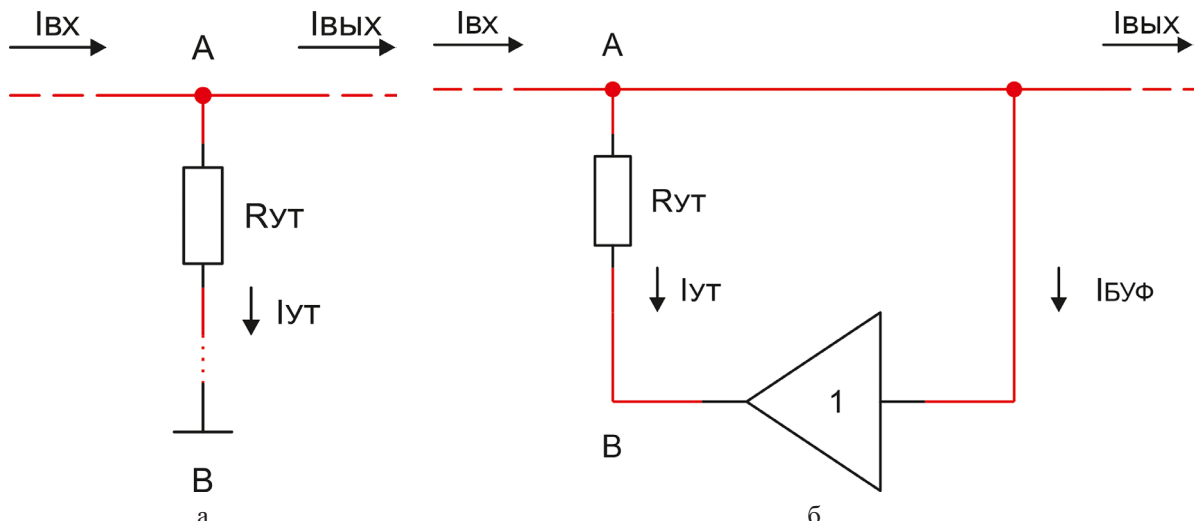


Рисунок 8. Бутстрепинг, принцип работы: обычная цепь (а); цепь с бутстрепингом (б)

Синфазное сопротивление $R_{\text{Синф}}$ ADA4530–1, определяемое по изменению входного тока I при изменении входного напряжения U_- , равного напряжению на коллекторе U_K , тоже крайне велико при температурах $T \leq 85^\circ\text{C}$, и его влиянием можно пренебречь. Куда более существенное влияние на входной ток оказывает утечка монтажа – сумма утечек от влияния множества узлов печатной платы, потенциалы которых существенно отличаются от потенциала входной цепи. Происхождение этих утечек связано с конечным сопротивлением изоляционных материалов – прежде всего материала платы. Если предположить, что совокупное сопротивление монтажа R_{PCB} составляет порядка $1 \dots 100 \text{ ТОм}$, то разность потенциалов $U_{\text{PCB}} = 1 \text{ В}$ на нём создаст ток от 10 до 1000 фА. Это одна из причин, по которой в качестве материала наружных слоёв плат при разработке макетов предусилителей был выбран керамический ламинат Rogers RO4350B. В таблице 2 приведены некоторые характеристики RO4350B в сравнении с другими ламинатами: Kingboard KB-6165F – типичным, широко используемым в России стеклотекстолитом FR-4 и распространённым композитом для ВЧ-применений Rogers RO3003 на основе фторопласта (ПТФЭ). Видно, что удельное поверхностное и объёмное сопротивление у RO4350B на порядок выше, чем у сте-

клотекстолита. Основой материала RO3003 является фторопласт, для которого характерна очень низкая диэлектрическая абсорбция и высокие значения удельных сопротивлений, однако типичные значения ρ_s и ρ_v конкретно этого композита даже ниже, чем у стеклотекстолита [16–19].

Применение качественного ламината само по себе ещё, конечно, не гарантирует хороших характеристик схемы. Радикальное снижение утечек монтажа возможно с помощью «охранного кольца» – частной формы бутстрепинга. Высокоомная входная цепь усилителя окружается по периметру проводником, соединённым с выходом GRD охранного буфера BUF микросхемы ADA4530–1, потенциал которого практически равен потенциалу инвертирующего входа усилителя (рисунок 9). Таким образом, на совокупном сопротивлении утечки монтажа R_{PCB} поддерживается пренебрежимо малое напряжение U_{PCB} порядка десятков микровольт, обусловленное смещением буфера $U_{\text{БУФ}}$ и входным смещением усилителя $U_{\text{ОУ}}$ (9) – это снижает утечки монтажа на много порядков.

$$U_{\text{PCB}} = U_{\text{GRD}} - U_- = U_+ + U_{\text{БУФ}} - (U_+ - U_{\text{ОУ}}) = U_{\text{БУФ}} + U_{\text{ОУ}}. \quad (9)$$

Таблица 2
Сравнение удельных сопротивлений (типичные значения) и диэлектрической абсорбции трёх распространённых ламинатов

Величина, обозначение, единица измерения	KB-6165F стеклотекстолит FR-4	RO3003 ПТФЭ – композит	RO4350B керамика
Удельное поверхностное сопротивление, ρ_s , Ом	$2,6 \cdot 10^{14}$	10^{13}	$5,7 \cdot 10^{15}$
Удельное объёмное сопротивление, ρ_v , Ом · м	$3,4 \cdot 10^{13}$	10^{11}	$1,2 \cdot 10^{14}$
Диэлектрическая абсорбция	Высокая	Низкая? (у фторопласта)	Очень низкая

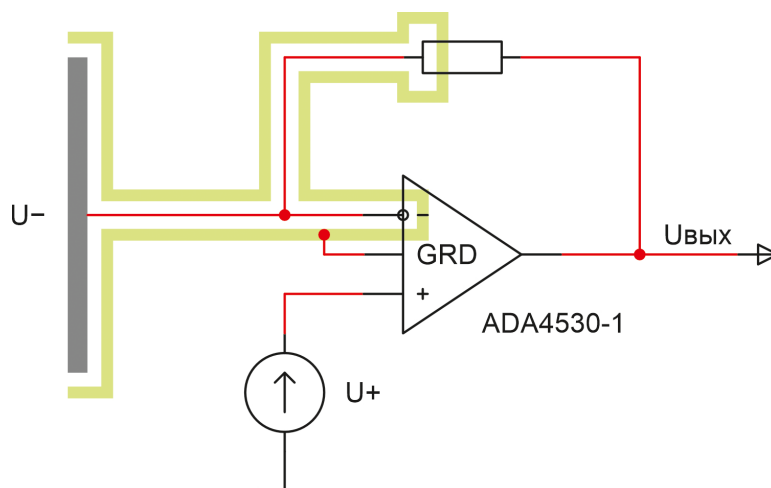


Рисунок 9. Защита высокоимпедансной входной цепи охранным кольцом

В трансимпедансном усилителе «охранные» элементы печатного монтажа можно подключать и напрямую к неинвертирующему входу ОУ, однако в наших схемах потенциал на нём задаётся от сравнительно высокоомного источника, поэтому охранные кольца запитаны именно через внутренний буфер ADA4530–1. На рисунке 10 показано охранное кольцо на плате предусилителя зонда Ленгмюра, а на рисунке 11 – фото платы с установленными элементами.

Утечки монтажа не ограничиваются одними лишь токами по поверхности печатной платы. На рисунке 12 показана рекомендуемая для ADA4530–1 и применённая в платах макетов предусилителей структура наружных слоёв [15], возможные направления паразитных токов и элементы защиты от них. Кроме поверхностных утечек I_s существуют токи I_v , распространяющиеся в толще диэлектрика и обусловленные его объёмной проводимостью. Как уже было показано в таблице 2, керамический ламинат в сравнении со стеклотекстолитом имеет на порядок большие удельные сопротивления ρ_s и ρ_v и потому более предпочтителен. Как и в случае с поверхностными утечками, для устранения токов в объёме диэлектрика применяется бутстрепинг в виде охранного полигона, лежащего под высокоомной цепью и соединённого с охранным кольцом на верхнем слое переходными отверстиями. Этими мерами высокоомная цепь электрически отделяется от остальной схемы и от нижележащих слоёв обычного стеклотекстолита. Тот же принцип используется и для плат-коллекторов заряда: в качестве верхнего слоя также используется Rogers RO4350B, а чувствительная область (собственно, сам коллектор) окружена охранным кольцом и защищена сплошным охранным полигоном во внутреннем слое (рисунок 13).

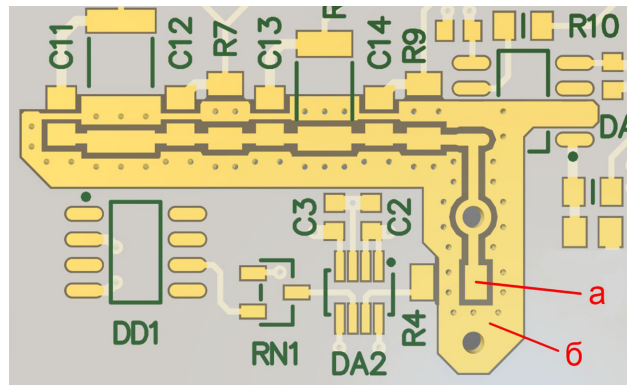


Рисунок 10. Высокоомная входная цепь (а) и охранный полигон (б) на плате предусилителя зонда Ленгмюра

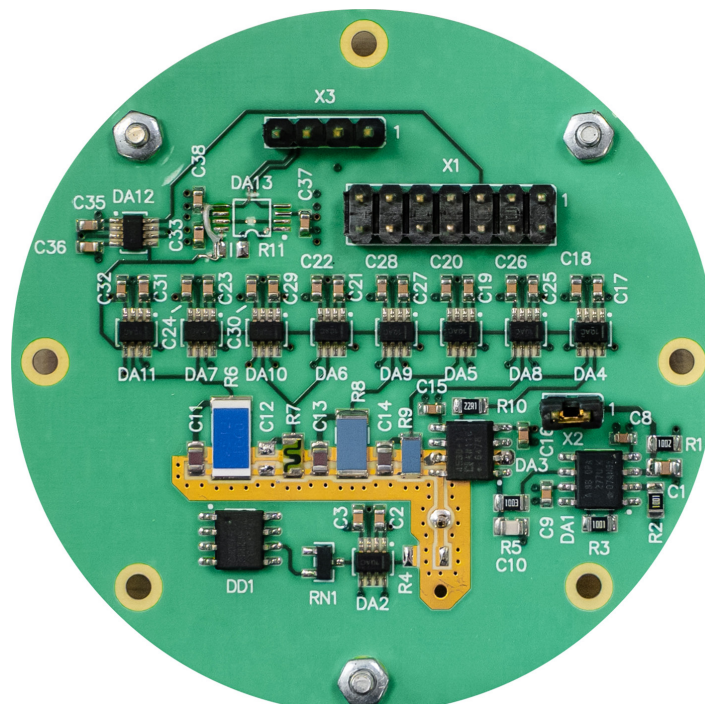


Рисунок 11. Предусилитель зонда Ленгмюра, макет

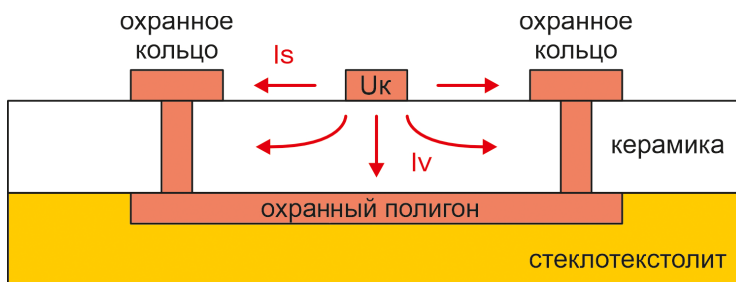


Рисунок 12. Возможная структура слоёв печатной платы, направления утечек и элементы защиты



Рисунок 13. Зонд Ленгмюра: коллектор (а) и охранный кольцо (б), макет

Утечки коммутаторов в ОС

Как видно из рисунка 5, в неактивной, разомкнутой ветви обратной связи ОУ к коммутатору приложено напряжение $U_{OFF} \approx U_{OC} = U_{ВЫХ} - U_- \approx -I_{ВХ} \cdot R_{OC1}$ (предполагаем, что сопротивление разомкнутого ключа $R_{OFF} \gg R_{OC2}$, и поэтому практически всё напряжение U_{OC} приложено именно к коммутатору). Это напряжение вызывает паразитный ток утечки через разомкнутый ключ, $I_{OFF} \approx U_{OC}/R_{OFF}$. Для простого аналогового ключа «четырёхтысячной» логической КМОП-серии CD4066B типичный ток утечки с входа на выход в разомкнутом состоянии составляет всего около 10 пА при температуре 25 °С, однако гарантируемые значения существенно выше: до 100 нА при 25 °С и не более 1 мкА при 85 °С [20]. Для максимального снижения утечек на уровне элементной базы в качестве коммутаторов ветвей ОС целесообразно использовать ключи с минимальными гарантируемыми значениями паразитных токов: например, прецизионные аналоговые ключи TMUX6119 имеют типичное значение утечки 5 пА и гарантируемый максимум 20 пА в нормальных условиях и не бо-

лее 80 пА при 85 °С (тесты проводятся при напряжении на ключе 9 В) – если ориентироваться на гарантируемые производителем значения, то можно сказать, что современный TMUX6119 на 3–4 порядка «лучше» старого CD4066B [21]. Как и в случае с паразитными токами монтажа, здесь тоже недостаточно просто выбрать хороший ключ – необходим бутстрепинг.

Для реализации бутстрепинга цепи ОС необходимо вместо одного применить два синхронно работающих ключа, один из которых должен иметь конфигурацию SPDT (один полюс, два направления). На рисунке 14 приведён вариант схемы такого бутстрепинга (для простоты показана только одна ветвь ОС), SA1 должен быть с малой утечкой, к SA2 такое требование не предъявляется. При размыкании ветви ОС на правом выводе ключа SA1 будет поддерживаться напряжение U_{GRD} с выхода охранный буфера – таким образом, к SA1 будет приложено только небольшое напряжение $U_{OFF} \approx U_{GRD} - U_- = U_{БУФ} + U_{ОУ}$ – в пределах десятков микровольт, как и в случае с рассмотренной выше утечкой монтажа (9). Это на много порядков меньше, чем 9 В, для которых приведены цифры в «даташите», поэтому можно ожидать,

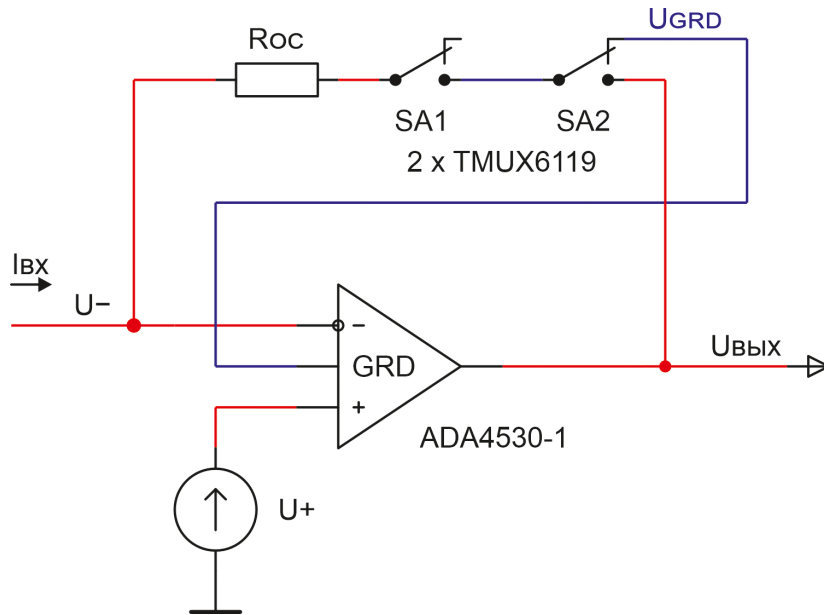


Рисунок 14. Бутстрепинг коммутаторов обратной связи

что с бутстрепингом утечки TMUX6119 упадут до пренебрежимо малых величин.

Диэлектрическая абсорбция и материал печатной платы

Диэлектрической абсорбцией в конденсаторах обычно называют явление сохранения части заряда на ранее заряженном конденсаторе, который был быстро разряжен до нулевого напряжения на обкладках. Причина этого явления – задержка перемещения заряда в конденсаторе, связанная с поляризацией диэлектрика. На рисунке 15 конденсатор с абсорбцией представлен в виде эквивалентной схемы – параллельного соединения нескольких ветвей с ёмкостями $C_1 > C_2 > C_N$ и сопротивлениями $R_1 < R_2 < R_N$ с постоянными времени $\tau_1 < \tau_2 < \tau_N$, которые соответствуют составляющим диэлектрика с разной скоростью поляризации. После заряда конденсатора до напряжения U_{C1} и его быстрого разряда кратковременным замыканием SA2 будем наблюдать постепенное вос-

становление на обкладках некоторого остаточного напряжения U_{C2} (рисунок 16). Численно абсорбция характеризуется отношением U_{C2}/U_{C1} – определяемая таким путём величина, разумеется, зависит не только от свойств диэлектрика, но и от условий эксперимента (например, времени разряда), однако позволяет, по крайней мере в качественном отношении, сравнивать разные диэлектрические материалы (лучше/хуже) [19].

В контексте измерения сверхмалого тока удобнее рассматривать это явление именно с точки зрения токов, а не напряжений, причём здесь мы говорим не о процессах в конденсаторах, а о диэлектрической абсорбции материала самой печатной платы. На рисунке 17 условно показана форма тока, протекающего в диэлектрике, к которому приложено ступенчато изменяющееся напряжение (используются обозначения из схемы на рисунке 15) [15]. Кривая тока условно разбита на три участка с отличающимися постоянными времени τ_1, τ_2, τ_N . Протекание в диэлектрике процессов не только быстрой, но и медленной поля-

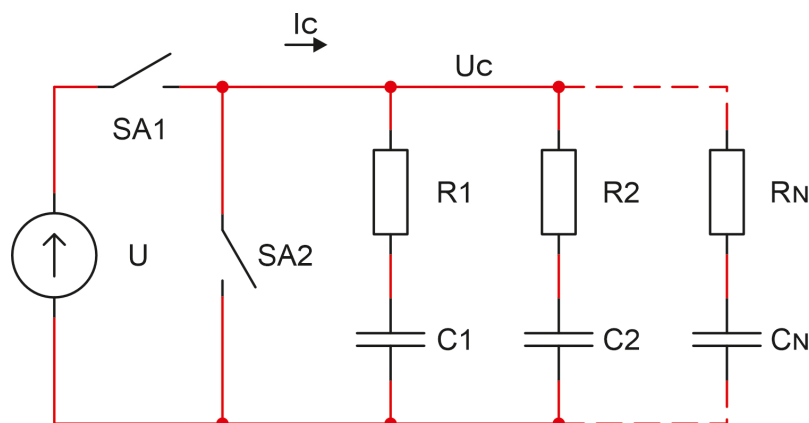


Рисунок 15. Эквивалентная схема для иллюстрации явления абсорбции в диэлектриках

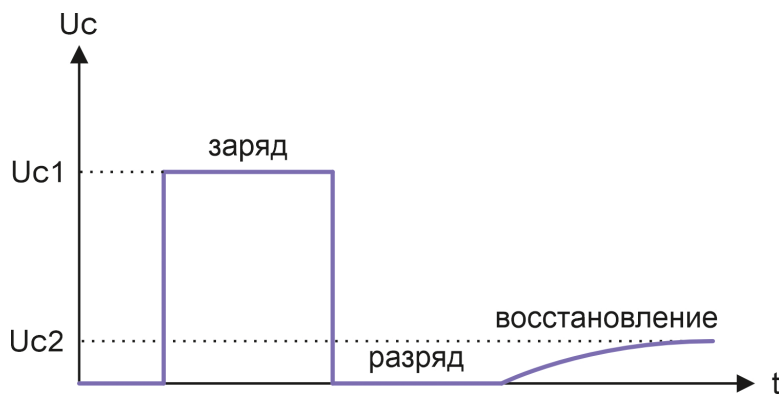


Рисунок 16. Восстановление напряжения на конденсаторе вследствие абсорбции

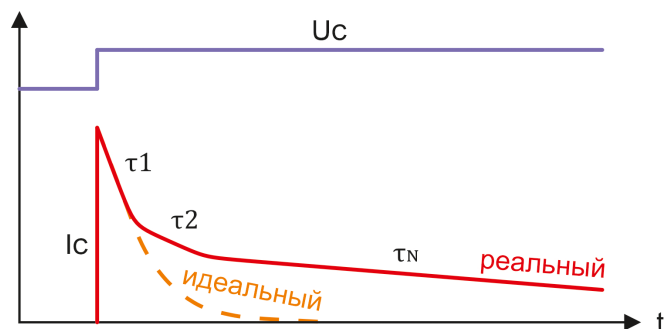


Рисунок 17. Форма тока в диэлектрике (условно) при подаче импульса напряжения

ризации является причиной «затягивания» зарядных токов в сравнении с идеальным диэлектриком, в котором абсорбция отсутствует. Это может стать серьёзной проблемой, например, при изменении потенциала коллектора зонда Ленгмюра, когда фактически меняется потенциал всей входной цепи – установление на выходе трансимпедансного усилителя достоверного напряжения из-за медленного затухания остаточных входных токов, вызванных абсорбцией материала печатной платы, может оказаться слишком длительным в условиях ограничений по времени эксперимента.

Сравнительные испытания демонстрируют полное превосходство керамического композита RO4350B над стеклотекстолитом FR-4 в части диэлектрической абсорбции (таблица 2). При подаче на образец стеклотекстолита испытательного напряжения ± 100 В требуется более часа, чтобы остаточные токи поляризации упали ниже 10 фА. В тех же условиях RO4350B ведёт себя совершенно иначе: до уровня 10 фА ток спадает за 10 с и до менее чем 1 фА за 20 с, поэтому для схем на ADA4530–1 производитель рекомендует применять именно RO4350B [15]. Хотя токи поляризации в керамическом ламинате спадают очень быстро, этого может оказаться недостаточно, если по условиям эксперимента потенциал коллектора должен меняться очень быстро, с интервалом в единицы-сотни миллисекунд, и при этом нуж-

но измерять очень слабые токи – скажем, менее 10...100 пА. В этом случае для входной цепи обязательно использование бутстрепинга, который поддерживает на окружённой охранными кольцами области печатной платы минимальное и практически неизменное напряжение и тем самым обеспечивает практически полное отсутствие токов поляризации.

Заключение

Измерение сверхмалых токов для определения параметров ионосферной плазмы зондовым методом имеет ряд технических сложностей и ограничений. Большинство из них могут быть преодолены сочетанием конструктивных и схемотехнических решений: выбором подходящей элементной базы и материала печатной платы, использованием следящей обратной связи, в том числе в виде охранных колец и полигонов для снижения утечек.

На основе изложенных в статье принципов были созданы макетные образцы ионной ловушки, зонда Ленгмюра и дрейфметра (рисунок 18), экспериментально подтверждена их работоспособность. Планируется испытать образцы датчиков на практически достижимый динамический диапазон по малому току и быстродействию для применения в бортовой аппаратуре будущих миссий по изучению космической плазмы.

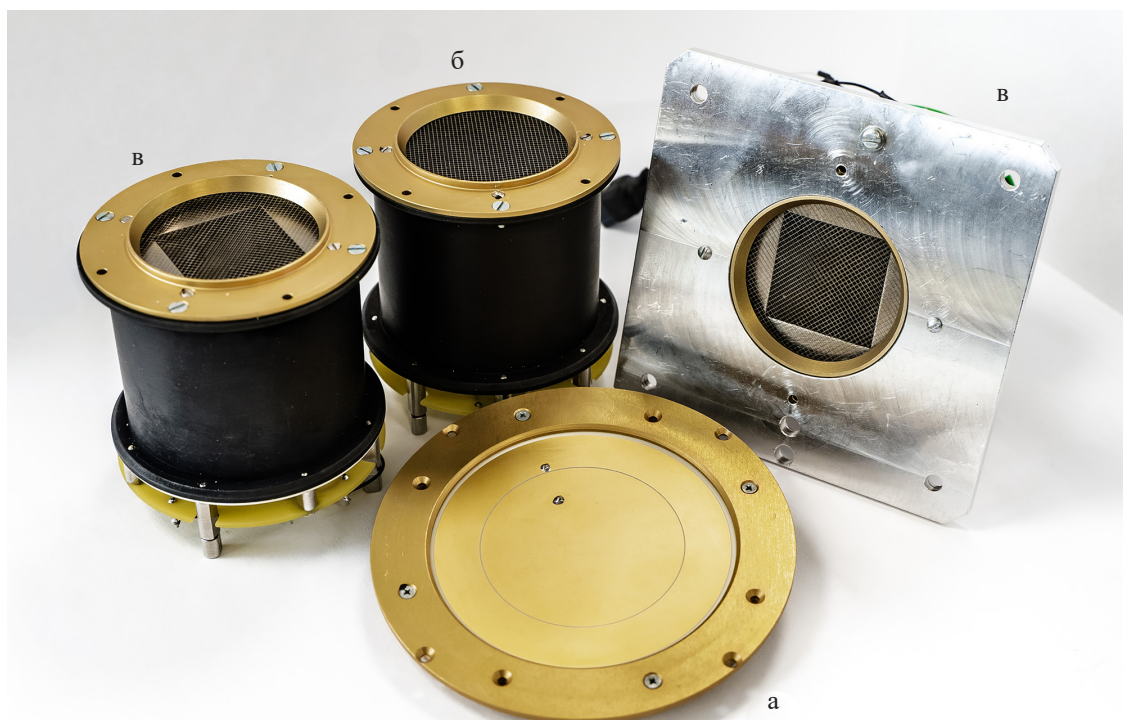


Рисунок 18. Макетные образцы плазменных датчиков: плоский зонд Ленгмюра (а), ионная ловушка (б), дрейфметры (в)

Список литературы

- [1] Плазменная гелиогеофизика / Под ред. Зелёного Л. М., Веселовского И. С. М.: Физматлит, 2008.
- [2] Schunk R., Nagy A. Ионосферы: физика, физика плазмы и химия. 2-е изд. Нью-Йорк, США: Издательство Кембриджского университета, 2009.
- [3] Козлов О. В. Электрический зонд в плазме. М.: Атомиздат, 1969.
- [4] Berthelier J. J., Godefroy M., Leblanc F., Seran E., Peschard D., Gilbert P., Artru J. IAP, анализатор тепловой плазмы на спутнике DEMETER // Наука космоса и планет. 2006. № 54.
- [5] Hoang H., Clausen L. B. N., Røed K., Bekkeng T. A., Trondsen E., Lybekk B., Strøm H., Bang-Hauge D. M., Pedersen A., Spicher A., Moen J. I. Многоигольчатая система зондов Ленгмюра на борту NorSat-1 // Обзоры космической науки. 2018. № 214.
- [6] Heelis R. A., Stoneback R. A., Perdue M. D., Depew M. D., Morgan W. A., Mankey M. W., Lippincott C. R., Harmon L. L., Holt B. J. Измерения скорости ионов для спутника Ionospheric Connections Explorer // Обзоры космической науки. 2017. № 212.
- [7] Fairchild Semiconductor. Каталог параметров линейных интегральных схем. Маунтин-Вью, Калифорния, США: Корпорация Fairchild, 1973.
- [8] Widlar R. J. Работа с высокоимпедансными операционными усилителями // Справочник по применению линейных схем. Санта-Клара, Калифорния, США: Корпорация National Semiconductor, 1994.
- [9] National Semiconductor. Справочник по линейным схемам 1. Санта-Клара, Калифорния, США: Корпорация National Semiconductor, 1988.
- [10] Horowitz P., Hill W. Искусство схемотехники. 3-е изд. Нью-Йорк, США: Издательство Кембриджского университета, 2016.
- [11] Precision Monolithics. Справочник по линейным схемам и преобразователям. Санта-Клара, Калифорния, США: Корпорация Precision Monolithics, 1986.
- [12] Linear Technology. Справочник по линейным схемам. 1990. Милпитас, Калифорния, США: Корпорация Linear Technology, 1989.
- [13] Burr-Brown. Справочник по интегральным схемам. Тусон, Аризона, США: Корпорация Burr-Brown, 1995.
- [14] National Semiconductor. Справочник по операционным усилителям National. Санта-Клара, Калифорния, США: Корпорация National Semiconductor, 1995.
- [15] Спецификация на электрометрический усилитель ADA4530-1 с фемтоамперным входным током смещения // analog.com: Корпорация Analog Devices URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ada4530-1.pdf> (дата обращения: 25.10.2024).

- [16] Спецификация на RO4003C и RO4350B – ламинаты серии RO4000 // rogerscorp.com: Корпорация Rogers URL: <https://www.rogerscorp.com/-/media/project/rogerscorp/documents/advanced-electronics-solutions/english/data-sheets/ro4000-laminates-ro4003c-and-ro4350b---data-sheet.pdf> (дата обращения: 25.10.2024).
- [17] Спецификация на ламинат KB-6165F // kblaminates.com: Компания Kingboard Laminates URL: <http://www.kblaminates.com/en/upload/ueditor/20240104/KB-6165F, KB-6065F.pdf> (дата обращения: 25.10.2024).
- [18] Материалы для печатных плат серии RO3000. Спецификация на высокочастотные ламинаты RO3003, RO3006, RO3010 и RO3035 // rogerscorp.com: Корпорация Rogers URL: <https://www.rogerscorp.com/-/media/project/rogerscorp/documents/advanced-electronics-solutions/english/data-sheets/ro3000-laminate-data-sheet-ro3003-ro3006-ro3010-ro3035.pdf> (дата обращения: 25.10.2024).
- [19] Справочник по малосигнальным измерениям. 7-е изд. // tek.com: Корпорация Tektronix URL: https://download.tek.com/document/LowLevelHandbook_7Ed.pdf (дата обращения: 25.10.2024).
- [20] Четверённые двунаправленные КМОП-ключи CD4066B // ti.com: Компания Texas Instruments URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd4066b.pdf> (дата обращения: 25.10.2024).
- [21] TMUX6119 – прецизионный однополюсный $\pm 16,5\text{В}$ ключ на два направления с малой ёмкостью и низким током утечки // ti.com: Компания Texas Instruments URL: <https://www.ti.com/lit/gpn/TMUX6119> (дата обращения: 25.10.2024).

LOW-CURRENT ELECTRONICS SCHEMATIC AND DESIGN SOLUTIONS FOR SPACE PLASMA CHARACTERISTICS MEASUREMENT

O.I. Rovnyakov, D.V. Chuginin, K.V. Anufreichik

*Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences
Moscow, The Russian Federation*

Measurement of the main characteristics of ionospheric plasma – concentration, temperature, velocity and its composition – is the problem of measuring ultra-low currents from a practical point of view. A low-current input stage based on a transimpedance amplifier suitable for measuring plasma characteristics using a Langmuir probe and a retarding potential analyzer is considered. The main problems and limitations affecting the dynamic range at very low currents are identified and ways to solve them are outlined. At the schematic level, various types of input stages of integrated operational amplifiers and their features affecting the choice of a suitable integrated circuit are listed, the input stage of the ADA4530–1 amplifier and the bootstrapping technique implemented in it are described. The importance of selecting low-leakage feedback switches is noted and the possibility of its further reduction using bootstrapping is demonstrated. At the design level, parasitic conductivity and dielectric absorption in insulating materials are considered, a printed circuit board material with good characteristics is mentioned, the use of guard rings and polygons for a radical reduction of circuit board leakage is described.

Keywords: scientific payload, ionospheric plasma parameters measurement, Langmuir probe, retarding potential analyzer, transimpedance amplifier, electrometry, low-current electronics.

References

- [1] Plazmennaya geliogeofizika [Plasma heliogeophysics] / Under the editorship of Zelenyi L. M., Veselovsky I. S. Moscow: Fizmatlit, 2008.
- [2] Schunk R., Nagy A. Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2009.
- [3] Kozlov O. V. Elektricheskij zond v plazme [Electric probe in plasma]. Moscow: Atomizdat, 1969.

- [4] Berthelie J.J., Godefroy M., Leblanc F., Seran E., Peschard D., Gilbert P., Artru J. IAP, the thermal plasma analyzer on DEMETER // Planetary and Space Science. 2006. № 54.
- [5] Hoang H., Clausen L.B.N., Røed K., Bekkeng T.A., Trondsen E., Lybekk B., Strøm H., Bang-Hauge D.M., Pedersen A., Spicher A., Moen J.I. The Multi-Needle Langmuir Probe System on Board NorSat-1 // Space Science Reviews. 2018. № 214.
- [6] Heelis R.A., Stoneback R.A., Perdue M.D., Depew M.D., Morgan W.A., Mankey M.W., Lippincott C.R., Harmon L.L., Holt B.J. Ion Velocity Measurements for the Ionospheric Connections Explorer // Space Science Reviews. 2017. № 212.
- [7] Fairchild Semiconductor. The Linear Integrated Circuits Data Catalog. Mountain View, CA: Fairchild Corporation, 1973.
- [8] Widlar R.J. Working with High Impedance Op Amps // Linear Applications Handbook. Santa Clara, CA: National Semiconductor Corporation, 1994.
- [9] National Semiconductor. Linear Databook 1. Santa Clara, CA: National Semiconductor Corporation, 1988.
- [10] Horowitz P., Hill W. The Art of Electronics. 3rd ed. New York: Cambridge University Press, 2016.
- [11] Precision Monolithics. Linear and Conversion Products Data Book. Santa Clara, CA: Precision Monolithics Inc., 1986.
- [12] Linear Technology. 1990 Linear Databook. Milpitas, CA: Linear Technology Corporation, 1989.
- [13] Burr-Brown. IC Data Book. Tucson, AZ: Burr-Brown Corporation, 1995.
- [14] National Semiconductor. National Operational Amplifiers Databook. Santa Clara, CA: National Semiconductor Corporation, 1995.
- [15] ADA4530–1 Femtoampere Input Bias Current Electrometer Amplifier Data Sheet // analog.com: Analog Devices URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ada4530-1.pdf> (accessed: 25.10.2024).
- [16] RO4000 Laminates RO4003C and RO4350B Data Sheet // rogerscorp.com: Rogers corporation URL: <https://www.rogerscorp.com/-/media/project/rogerscorp/documents/advanced-electronics-solutions/english/data-sheets/ro4000-laminates-ro4003c-and-ro4350b---data-sheet.pdf> (accessed: 25.10.2024).
- [17] KB-6165F Laminate Datasheet // kblaminates.com: Kingboard Laminates URL: <http://www.kblaminates.com/en/upload/ueditor/20240104/KB-6165F, KB-6065F.pdf> (accessed: 25.10.2024).
- [18] RO3000 Series Circuit Materials. RO3003, RO3006, RO3010 and RO3035 High Frequency Laminates Data Sheet // rogerscorp.com: Rogers corporation URL: <https://www.rogerscorp.com/-/media/project/rogerscorp/documents/advanced-electronics-solutions/english/data-sheets/ro3000-laminate-data-sheet-ro3003-ro3006-ro3010-ro3035.pdf> (accessed: 25.10.2024).
- [19] Low Level Measurements Handbook – 7th Edition // tek.com: Tektronix URL: https://download.tek.com/document/LowLevelHandbook_7Ed.pdf (accessed: 25.10.2024).
- [20] CD4066B CMOS Quad Bilateral Switch // ti.com: Texas Instruments URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/26881/TI/CD4066B.html> (accessed: 28.10.2024).
- [21] TMUX6119 ±16.5-V, Low Capacitance, Low-Leakage-Current, Precision, SPDT Switch // ti.com: Texas Instruments URL: <https://www.ti.com/lit/gpn/TMUX6119> (accessed: 25.10.2024).

Сведения об авторах

Ровняков Олег Игоревич – ведущий инженер Института космических исследований РАН. Окончил Донецкий национальный технический университет в 2010 году. Область научных интересов: космическое приборостроение, электроника.

Чугунин Дмитрий Владимирович – младший научный сотрудник Института космических исследований РАН. Окончил Московский физико-технический институт (государственный университет) в 1997 году. Область научных интересов: космическая плазма, ионосферно-магнитосферные связи, авроральные явления.

Ануфрейчик Константин Владимирович – начальник лаборатории Института космических исследований РАН. Окончил Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» в 2002 году. Область научных интересов: космическое приборостроение, встраиваемое программное обеспечение.

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 spacecrafts.technologies@yandex.ru

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.

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).

