# 

# КА «Экспресс-РВ» Разработчик и производитель: АО «РЕШЕТНЁВ»



Технологическая платформа

Национальная Информационная Спутниковая Система №3 (45) 2023



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



Том 7

№ 3 (45) 2023

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

Ответственный секретарь Леонидов Николай Владимирович (Железногорск)

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) **Махутов Николай Андреевич** кор. РАН, д-р техн. наук, профессор (Москва) чл.-кор. Р Петрукович Анатолий Алексеевич АН, д-р физ.-мат. наук, профессор (Москва) Шайдуров Владимир Викторович ор. РАН, д-р физ.-мат. наук (Красноярск) Беляев Борис Афанасьевич д-р техн. наук, профессор (Красноярск) Гарин Евгений Николаевич д-р техн. наук, профессор (Красноярск) Косенко Виктор Евгеньевич д-р техн. наук, профессор (Железногорск) Красильщиков Михаил Наумович д-р техн. наук, профессор (Москва) Медведский Александр Леонидович д-р физ.-мат. наук (Жуковский) 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 (Ќоролёв) Чеботарев Виктор Евдокимович д-р техн. наук, профессор (Железногорск) Чернявский Александр Григорьевич Королёв)

#### 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 ка́нд. 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 2021 г. – 0,283.

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

Тематические направления журнала:

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

К публикации принимаются статьи, ранее нигде не опубликованные и не представленные к печати в других изданиях. Статьи, отбираемые для публикации в журнале, проходят закрытое (двойное слепое) рецензирование. Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе. Полнотекстовый доступ к электронной версии журнала возможен на сайтах www.elibrary.ru, www.cyberleninka.ru, www.readera.org

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

Адрес учредителя, редакции и издателя: 662972, Красноярский край, 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 19910 Дата выхода в свет 26.09.2023

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 (Russian Federation)

**Deputy Chief Editor** 

Khalimanovich Vladimir I. PhD in Physics and Mathematics, Professor (Russian Federation)

**Executive Secretary** 

Leonidov Nikolai V. (Russian Federation)

**Editorial Board** 

Alifanov Oleg M. Academician of RAS, Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation) Annin Boris D.

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

Popov Garry A.

Academician of RAS, Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation) Shabanov Vasily Ph. Academician of RAS, Doctor of Physics and Mathematics, Professor (Russian Federation)

Vasiliev Valery V.

Academician of RAS, Doctor of Engineering, Professor (Russian Federa

Makhutov Nikolay A. Corresponding Member of RAS, Doctor of Engineering, Professor (Russian

Federation) Petrukovich Anatoly A.

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

Shaidurov Vladimir V.

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

Belyaev Boris A.

Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation) Chebotarev Victor E. Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

Garin Eugene N. Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

Khartov Victor V.

Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation) Kosenko Victor E.

Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation) Krasilshchikov Michael N.

Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation) Medvedtskiy Alexander L.

Doctor of Physics and Mathematics (Russian Federation) Nadiradze Andrey B.

Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

Ovchinnikov Sergey G.

Doctor of Physics and Mathematics, Professor (Russian Federation) Panko Sergey P.

Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

Pchelyakov Oleg P. Doctor of Physics and Mathematics, Professor (Russian Federation)

Cherniavsky Alexander G. (Russian Federation)

**Editorial Council** Golovenkin Eugene N.

Doctor of Engineering, Professor, Pr

rofessor (Russian Federation) Dvirny Valery V.

Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

Lopatin Alexander V. Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

Okhotkin Kirill G.

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

Ponomarev Sergey V. Doctor of Physics and Mathematics (Russian Federation)

Khartov Stanislav V.

PhD in Engineering (Russian Federation) Matveev Stanislav A.

PhD in Engineering (Russian Federation)

Nepomnyashy Oleg V.

PhD in Engineering, Associate P ofessor (Russian Federation Simunin Mikhail M.

PhD in Engineering, Associate Professor (Russian Federation)

Smotrov Andrey V.

PhD in Engineering (Russian Federation) Sukhotin Vitalu V

PhD in Engineering, Associate Professor (Russian Federation)

# Scientific quarterly journal Published since 2012

### ISSN 2618-7957

Publisher and Founder: Association «Technology Platform «National Information Satellite System»

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

The journal is registered by the the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications

(PI certificate no. FS77-72862, May 22, 2018).

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

The journal sections:

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

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

The publication of manuscripts is free of charge.

The journal is on open access on www.elibrarv.ru. www.cyberleninka.ru, www.readera.org

#### Contents

В номере

#### космическое приборостроение

- А.Д. Широков, Д.А. Феоктистов, Т.Г. Орешенко, М.С. Федоров, А.В. Чубарь ВЕРИФИКАЦИЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЗОЧНЫХ УСТРОЙСТВ, ЗАЯВЛЕННЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕМ
  - А.С. Титова, А.С. Саблин, М.А. Загайнов, С.А. Кузнецов ОСОБЕННОСТИ АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ПРИВОДА ВРАЩЕНИЯ МЕХАНИЗМОВ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА
  - А.В. Шагов, В.В. Сухотин, Т.А. Зубов КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ БОРТОВОГО РЕТРАНСЛЯЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ АНАЛИЗА ФАЗОВЫХ ИСКАЖЕНИЙ СИГНАЛА

#### НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ В КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ

- А.В. Иванов, К.А. Кушнир, М.С. Симонова РАЗРАБОТКА СПОСОБА РАЗДЕЛЕНИЯ РАДИООТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КРУПНОГАБАРИТНОГО РЕФЛЕКТОРА НА ВЫКРОЙКИ ИЗ СЕТЕПОЛОТНА С КРУПНОЙ ЯЧЕЙКОЙ
- В.В. Тимофеев, И.В. Трифанов, Е.В. Патраев МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОПЕРЕЧНО-ГОФРИРОВАННОЙ ОБОЛОЧКИ ВОЛНОВОДА

#### ИННОВАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

**М.Ю. Яценко, В.А. Воронцов, В.В. Рыжков** СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МУЛЬТИРОТОРНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА КАК ПЕРСПЕКТИВНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО СРЕДСТВА ИЗУЧЕНИЯ АТМОСФЕРЫ И ПОВЕРХНОСТИ ПЛАНЕТЫ ВЕНЕРА

#### SPACE INSTRUMENT ENGINEERING

- 181 A. D. Shirokov, D.A. Feoktistov, T.G. Oreshenko, M. S. Fedorov, A. V. Chubar VERIFICATION OF FREQUENCY CHARACTERISTICS OF LOAD DEVICES DECLARED BY THE MANUFACTURER
- 186 A.S. Titova, A.S. Sablin, M.A. Zagainov, S.A. Kuznetsov
   FEATURES OF DYNAMIC LOAD ANALYSIS OF SPACECRAFT ROTATIONAL DRIVE MECHANISMS
- 193 A.V. Shagov, V.V. Sukhotin, T.A. Zubov COMPUTER MODEL OF THE TRANSPONDER FOR THE ANALYSIS OF PHASE DISTORTIONS OF THE SIGNAL

# NEW MATERIALS AND TECHNOLOGIES IN SPACE EQUIPMENT

- 202 A.V. Ivanov, K.A. Kushnir, M.S. Simonova DEVELOPMENT METHOD OF SPLITTING THE RADIO-REFLECTIVE LARGE-SIZED REFLECTOR SURFACE INTO CUTTING PATTERNS MADE OF MESH WITH COARSE CELLS
- 211 V.V. Timofeev, I.V. Trifanov, E.V. Patraev MATHEMATICAL MODELING OF CROSS-CORRUGATED WAVEGUIDE SHELL FORMATION

#### INNOVATIONS OF THE SPACE INDUSTRY

220 M. Yu. Yatsenko, V.A. Vorontsov, V.V. Ryzhkov SYSTEM ENGINEERING RESEARCH OF A MULTIROTOR AIRCRAFT AS A PROSPECTIVE TECHNICAL MEANS OF EXPLORING THE ATMOSPHERE AND SURFACE OF THE PLANET VENUS УДК 621.3.012.6 DOI 10.26732/j.st.2023.3.01

# ВЕРИФИКАЦИЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЗОЧНЫХ УСТРОЙСТВ, ЗАЯВЛЕННЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕМ

# А.Д. Широков, Д.А. Феоктистов, Т.Г. Орешенко<sup>,</sup>, М.С. Федоров, А.В. Чубарь

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

Целью работы являлось уточнение возможности определения частотных характеристик нагрузочных устройств по параметрам переходных процессов, скорости нарастания переднего фронта, его длительности, наличию или отсутствию перерегулирования, форме переходного процесса. Основная задача исследования состояла в определении параметров нагрузки, необходимых для выполнения расчета. Для подтверждения указанной гипотезы о влиянии выбранных параметров использован метод физического эксперимента. Уточнение показателей по эксплуатационным параметрам может быть актуальным при организации входного контроля поступающих покупных изделий для различных прикладных задач. Совершенствование алгоритмов входного контроля, реализация проверок временных характеристик вместо частотных позволят подтвердить соответствие характеристик, заявленных производителем либо поставщиком данного оборудования, и дадут возможность идентифицировать внутреннюю структуру устройств в обеспечение их совместимости с прочим оборудованием, применяемым на производстве, а также расширить технологические возможности предприятий. Обозначенная проблема представляется перспективной для ряда организаций, эксплуатирующих сложную электронную технику, а также для отечественных производителей электронных устройств. Актуальность исследования также заключается в уменьшении количества, требуемого для процесса верификации оборудования за счет увеличения вычислительной нагрузки. Кроме того, динамическая идентификация по параметрам переходных процессов повышает скорость проведения верификации.

Ключевые слова: нагрузочное устройство, частотные характеристики, импеданс.

# Введение

Активное использование нагрузочных устройств при испытании преобразующего оборудования определяет необходимость подтверждения их характеристик. Существует ряд подходов к уточнению характеристик подобного рода устройств в зависимости от их мощности, однако отраслевых стандартов для проведения процедуры оценки до сих пор нет.

Следует отметить, что при работе систем электропитания характер работы нагрузочного устройства изменяется в течение суток, в зависимости от текущих потребностей в том или ином оборудовании. Как уже упоминалось в [1], характер нагрузки может быть активным, реактивным и смешанным. Так, в работах [2, 3] приводятся данные о возможности проверки характеристик нагрузочных устройств.

# 1. Теория расчёта импеданса

В общем случае нагрузочное устройство должно быть подключено к поверенному источнику питания. Сбор данных должен производиться при различной частоте и форме входного сигнала аттестованным и калиброванным оборудованием [4]. Сигнал должен изменяться в диапазоне заявленных производителем частот с регулируемой амплитудой.

В качестве примера можно привести проверку электронной управляемой нагрузки EA-EL9360–120, которая осуществлялась путем подключения к программируемому источнику питания Lambda. На ис-

<sup>⊠</sup> veisver@mail.ru

<sup>©</sup> Ассоциация «ТП «НИСС», 2023



точнике устанавливалось напряжение питания 100 В, на нагрузке ток 2А. Сигнал имел синусоидальную форму с частотой от 500 до 10 кГц и прямоугольную форму с частотой от 1 до 10 кГц.

Цель исследования – проверка заявленных характеристик, а также выявление особенностей работы нагрузочного устройства на частотах, близких к верхней границе заявленного диапазона. Это направление исследования представляется актуальным ввиду необходимости обеспечения метрологической точности как при операциях калибровки источников питания, так и при измерении параметров исследуемых или изготавливаемых преобразовательных устройств [5]. Чтобы наиболее полно представить порядок оценки характеристик электронной нагрузки, необходимо обратиться к схеме, представленной на рис. 1. Измерения производились при помощи токового пистолета, подключенного к усилителю и далее к осциллографу.

Приведенная схема измерения позволяет оценить нестабильность характеристик испытываемого нагрузочного устройства. При этом источник питания подключен в режиме стабилизации напряжения (control voltage), а нагрузочное устройство – в режиме стабилизации тока (control current).

При этом, зная напряжение источника питания, можно оценить импедансную частотную характеристику нагрузочного устройства по переходным процессам, так как отклик системы на входное воздействие напрямую связан с обменом энергией внутри устройства, исходя из характера которого можно говорить о присутствии резистивных, емкостных и индуктивных элементов в цепи, а также о диапазоне рабочих частот [6].

На рис. 2 представлены изменения тока нагрузки при различной частоте ее работы и прямоугольном характере переключения.



Рис. 1. Схема для оценки характеристик нагрузочного устройства



Рис. 2. Осциллограммы тока на частотах переключения нагрузки: a – 10 Гц; б – 1 кГц; в – 6 кГц; г – 8 кГц

#### А.Д. Широков, Д.А. Феоктистов, Т.Г. Орешенко, М.С. Федоров, А.В. Чубарь

Верификация частотных характеристик нагрузочных устройств, заявленных производителем

Исходя из полученных осциллограмм следует отметить индуктивно-резистивный характер нагрузки [7]. Отчетливо видно затягивание фронтов переходного процесса с увеличением частоты переключения.

# 2. Расчёт импеданса

Схема замещения при выполнении указанного эксперимента представлена на рис. 3.



Рис. 3. Схема замещения при проверке характеристик нагрузочного устройства

Согласно второму закону Кирхгофа

$$U = I \cdot R + L \frac{dI}{dt}$$

где U – напряжение источника питания, I – ток в нагрузочном устройстве, R – сопротивление нагрузочного устройства, L – индуктивность нагру-

зочного устройства,  $\frac{dI}{dt}$  – скорость нарастания тока

при переходном процессе длительностью dt.

# Список литературы



Рис. 4. Рассчитанный импеданс исследуемого нагрузочного устройства

Зная напряжение источника питания и оценивая скорость нарастания тока при переходном процессе, можно определить импеданс нагрузочного устройства на разных частотах [8] (рис. 4).

#### Заключение

Таким образом, форма переходного процесса позволяет с определенной степенью точности выявить импедансные частотные характеристики нагрузочных устройств [9]. При проведении эксперимента достаточно наличие осциллографа и датчика тока. После регистрации параметров переходного процесса выполняется расчет частотных характеристик [10].

- [1] Юдинцев А.Г., Бубнов О.В., Дементьев Ю.Н. Нагрузочные устройства для испытаний систем электропитания космических аппаратов // Известия Томского политехнического университета. 2004. Т. 307 № 6. С. 126–130.
- [2] Мизрах Е. А., Лобанов Д. К. Динамический синтез нагрузочных устройств с рекуперацией электроэнергии в сеть электропитания испытательного комплекса энергосистем космического аппарата // Вестник СибГАУ. 2011. Вып. 4 (37). С. 142–147.
- [3] Мизрах Е. А., Лобанов Д. К. Энергосберегающее нагрузочное устройство для испытаний систем электропитания постоянного тока // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 6 (32). С. 56–61.
- [4] Специальные электрические машины: (Источники и преобразователи энергии): учеб. пособие для вузов / А.И. Бертинов, Д.А. Бут, С.Р. Мизюрин и др.; под ред. А.И. Бертинова. М.: Энергоатомиздат, 1982. 552 с.
- [5] Соустин Б. П., Иванчура В. И., Чернышев А. И., Исляев Ш. Н. Системы электропитания космических аппаратов. Новосибирск: ВО «Наука», Сибирская издательская фирма, 1994. 318 с.
- [6] Иванчура В. И., Краснобаев Ю. В., Пожаркова И. Н. Определение входного импеданса системы каналов энергопотребления по ограниченным данным о конечных потребителях // «Электронные и электромеханические системы и устройства»: тезисы докладов XVII НТК. Томск: ФГУП НПЦ «Полюс», 2006. С. 29–32.
- [7] А.С. № 1797079 СССР, (МКИ) G01R 27/26. Способ измерения электрических величин активного сопротивления, индуктивности и емкости / В.С. Мелентьев, В.С. Баскаков и др., опубл. в Б.И. 1993, № 7.
- [8] Мелентьев В.С. Определение параметров электрических цепей по переходным характеристикам в измерительной цепи // Математическое моделирование и краевые задачи: тр. Всерос. науч. конф. Ч. 2. Самара: СамГТУ, 2004. С. 158–160.
- [9] Пат. № 2187822 РФ, (МКИ) G01R 23/16. Способ определения параметров переходного процесса / М. Р. Сафаров, Л. В. Сарваров; опубл. в БИПМ. 2002, № 23.



[10] Мелентьев В.С. Методы определения параметров переходных процессов в электрических цепях // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. Науки. 2004. Вып. 30. С. 190–194.

# VERIFICATION OF FREQUENCY CHARACTERISTICS OF LOAD DEVICES DECLARED BY THE MANUFACTURER

# A. D. Shirokov, D.A. Feoktistov, T.G. Oreshenko, M.S. Fedorov, A.V. Chubar

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

The aim of the work was to clarify the possibility of determining the frequency characteristics of load devices according to the parameters of transients, the rate of rise of the leading edge, its duration, the presence or absence of overshoot, the form of the transient process. The main objective of the study was to determine the load parameters required to perform the calculation. To confirm this hypothesis about the influence of the selected parameters, the method of physical experiment was used. The specification of indicators for operational parameters may be relevant when organizing the input control of incoming purchased products for various applied tasks. The improvement of input control algorithms, the implementation of time characteristics checks instead of frequency ones will confirm the compliance of the characteristics declared by the manufacturer or supplier of this equipment and provide the possibility of identifying the internal structure of devices to ensure their compatibility with other equipment used in production, as well as expand the technological capabilities of enterprises. The indicated problem seems promising for a number of organizations operating complex electronic equipment, as well as for domestic manufacturers of electronic devices. The relevance of the study also lies in reducing the amount required for the verification process of equipment by increasing the computational load. In addition, dynamic identification by transient parameters increases the speed of verification.

Keywords: load device, frequency characteristics, impedance.

# References

- [1] Yudintsev A.G., Bubnov O.V., Dementiev Yu.N. Load devices for testing spacecraft power supply systems / Proceedings of Tomsk Polytechnic University. 2004. Vol. 307 No. 6. pp. 126–130.
- [2] Mizrakh E. A., Lobanov D. K. Dynamic synthesis of load devices with power recovery into the power supply network of the test complex of the spacecraft power systems // Bulletin of SibGAU. 2011. Issue 4 (37). pp. 142–147.
- [3] Mizrakh E.A., Lobanov D.K. Energy-saving load device for testing DC power supply systems // Bulletin of SibGAU. 2010. Issue 6 (32). pp. 56–61.
- [4] Special electric machines: (Energy sources and converters). Textbook for universities / A.I. Bertinov, D.A. Booth, S.R. Mizyurin, etc.; Edited by A.I. Bertinov. M.: Energoatomizdat, 1982. 552 p.
- [5] Soustin B. P., Ivanchura V. I., Chernyshev A. I., Islyaev Sh. N. Power supply systems of spacecraft. Novosibirsk: IN "Science", Siberian Publishing company, 1994. 318 p.
- [6] Ivanchura V. I., Krasnobaev Yu.V., Pozharkova I.N. Determination of the input impedance of the system of energy consumption channels based on limited data on end users // "Electronic and electromechanical systems and devices". Abstracts of the reports of the XVII STC. Tomsk: FSUE SPC "Polyus", 2006. pp. 29–32.
- [7] A.S. № 1797079 SSSR, (MKI) G01R 27/26. Sposob izmereniya elektricheskih velichin aktivnogo soprotivleniya, induktivnosti i emkosti / V.S. Melent'ev, V.S. Baskakov i dr., opubl. v B.I. 1993, № 7.
- [8] Melent'ev V.S. Opredelenie parametrov elektricheskih cepej po perekhodnym harakteristikam v izmeritel'noj cepi // Matematicheskoe modelirovanie i kraevye zadachi: Tr. Vseros. nauch. konf. CH.2. Samara: SamGTU, 2004. pp. 158–160.

184

#### А.Д. Широков, Д.А. Феоктистов, Т.Г. Орешенко, М.С. Федоров, А.В. Чубарь

Верификация частотных характеристик нагрузочных устройств, заявленных производителем

- [9] Pat. № 2187822 RF, (MKI) G01R 23/16. Sposob opredeleniya parametrov perekhodnogo processa / M. R. Safarov, L. V. Sarvarov, opubl. V BIPM. 2002, № 23.
- [10] Melent'ev V.S. *Metody opredeleniya parametrov perekhodnyh processov v elektricheskih cepyah*, Vestn. Sam. gos. tekhn. un-ta. Ser. Fiz.-mat. nauki, 2004, vypusk 30, pp. 190–194.

# Сведения об авторах

Широков Алексей Дмитриевич – студент 5-го курса кафедры систем автоматического управления Сибирского государственного университета науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева. Область научных интересов: программирование систем автоматического управления, технология проведения испытаний, теория автоматического управления.

Феоктистов Данил Александрович – студент 5-го курса кафедры систем автоматического управления Сибирского государственного университета науки и технологий им. акад. М. Ф. Решетнева. Область научных интересов: Теория автоматического управления, системы управления летательными аппаратами.

Орешенко Татьяна Геннадьевна – доцент кафедры систем автоматического управления Сибирского государственного университета науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева, канд. техн. наук, окончила Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М.Ф. Решетнева в 2010 году по специальности «Системы управления летательными аппаратами». Область научных интересов: системы управления, надежность, преобразовательные устройства.

Федоров Михаил Сергеевич – студент 5-го курса кафедры систем автоматического управления Сибирского государственного университета науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева. Область научных интересов: организация входного контроля, технология проведения испытаний, преобразовательные устройства.

*Чубарь Алексей Владимирович* – доцент кафедры систем автоматического управления Сибирского государственного университета науки и технологий им. акад. М. Ф. Решетнева, канд. техн. наук. Область научных интересов: системы управления, моделирование систем управления, преобразовательные устройства. УДК 62-83, 621.83 DOI 10.26732/j.st.2023.3.02

# ОСОБЕННОСТИ АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ПРИВОДА ВРАЩЕНИЯ МЕХАНИЗМОВ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

# А.С. Титова<sup>1</sup>, А.С. Саблин<sup>1</sup>, М.А. Загайнов<sup>1</sup>, С.А. Кузнецов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация <sup>2</sup>АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва», г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация

Рассматривается исполнительный прецизионный универсальный мехатронный модуль, позволяющий совершать высокоточное вращательное движение выходного кинематического звена. Универсальный мехатронный модуль предназначен для создания кинематики мехатронных систем наведения и позиционирования объектов авиационно-космической техники. Ключевыми особенностями исполнительного прецизионного универсального мехатронного модуля являются высокая точность позиционирования, малые масса и габаритные размеры. Цель работы – создание конечно-элементной модели и проведение анализа динамических нагрузок для оценки стойкости конструкции к внешним вибрационным нагрузкам. В первом разделе описывается создание конечно-элементной модели с учетом радиальной и осевой жесткости опорных элементов конструкции. Во втором разделе описано выполнение статического анализа для создания преднагруженного состояния и проведение динамического анализа. Исследовано влияние синусоидальной и случайной вибраций, определены собственные частоты конструкции универсального мехатронного модуля.

Ключевые слова: редуктор, привод, космический аппарат, метод конечных элементов, вибрация.

# Введение

Основными особенностями разрабатываемого типоразмерного ряда универсальных мехатронных модулей (УММ) является модульная конструкция, малые масса и габаритные размеры, высокая удельная мощность и универсальность применения. Модульная конструкция позволяет быстро модифицировать УММ в соответствии с конструктивными особенностями и техническими требованиями отдельных узлов и механизмов космического аппарата (КА). Модули предназначены для применения в системах ориентации антенн, устройствах позиционирования солнечных батарей, манипуляторов.

Анализ влияния динамических нагрузок на объект разработки на этапе проектирования позволяет доработать и улучшить разработанную конструкцию до начала проведения испытаний. Динамические нагрузки характеризуются быстрым изменением во времени и возникают под действием вибрационной нагрузки. Возникновение динамических нагрузок при эксплуатации УММ связано с воздействием ускорений и сил инерции, возникающих в процессе вывода космического аппарата на орбиту.

Динамический анализ необходим для проектирования структурных и механических систем, работающих без потери устойчивости и последующего разрушения в динамических средах, а также подбора характеристик разрабатываемой системы (формы, механизмов демпфирования, свойств материала, и т.п.), чтобы уменьшить влияние вибрации [1, 2].

В качестве современного подхода для выполнения динамического анализа применяется метод конечных элементов (МКЭ). По результатам МКЭ можно выявить узлы конструкции, требующие доработки для повышения стойкости к механическим воздействиям. МКЭ позволяет оптимизировать процесс разработки, снизить затраты на изготовление макетных и экспериментальных образцов, ускорить проведение испытаний. Такой

<sup>🖂</sup> ksa@iss-reshetnev.ru

<sup>©</sup> Ассоциация «ТП «НИСС», 2023

подход широко применяется из-за высокой степени точности совпадения результатов расчетов и испытаний [3-9].

Цель настоящего исследования заключается в создании конечно-элементной модели (КЭМ) исполнительного прецизионного мехатронного модуля (УММ-ИП) и проведении динамического анализа нагрузок и переходных процессов, возникающих при работе УММ-ИП.

# 1. Создание конечно-элементной модели

Исследуемый УММ-ИП конструктивно состоит из гибридного шагового двигателя, планетарной и волновой передачи, датчика углового положения типа «вращающийся трансформатор». Кинематическая схема представлена на рис. 1.



- Рис. 1. Кинематическая схема устройства: I – входной вал; II – выходной вал;
  - 1 гибридный шаговый двигатель;
- 2 гибкое колесо волнового редуктора;
- 3 жесткое колесо волнового редуктора;
  - 4 вращающийся трансформатор

Для проведения анализа динамических нагрузок используется конечно-элементная модель (КЭМ), которая была разработана с помощью Ansys Workbench аналогично имитационной модели, представленной в статье [10]. Для уменьшения времени расчета и накапливаемой ошибки трехмерная модель УММ-ИП упрощена за счет удаления фасок и скруглений, не участвующих в расчете.

Отличительной особенностью КЭМ для проведения динамического анализа является то, что вместо подвижного соединения «Revolute Joint», при котором соединение между поверхностями считается абсолютно жестким, что недопустимо для проведения динамического анализа, используется функция «Bearing», которая позволяет представить подшипник как систему пружин с заданной жесткостью и создает конечный элемент типа «COMBI214», представленный на рис. 2.



Рис. 2. Изображение элемента COMBI214

Данный элемент позволяет задать коэффициенты матрицы жесткости подшипника –  $K_{11}$ ,  $K_{12}$ ,  $K_{21}$ ,  $K_{22}$ . Матрица жесткости:

$$\begin{bmatrix} K_e \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & -K_{11} & -K_{12} \\ K_{21} & K_{22} & -K_{21} & -K_{22} \\ -K_{11} & -K_{12} & K_{11} & K_{12} \\ -K_{21} & -K_{22} & K_{21} & K_{22} \end{pmatrix}$$

Элемент «COMBI214» не исключает перемещения тел вдоль оси вращения, поэтому требуется задать элемент типа «Spring» (пружина) – упругий элемент, позволяющий задать кривую жесткости. В расчете на динамические нагрузки с помощью элемента «Spring» осевая жесткость подшипника задается графиком зависимости силы приложенной нагрузки от перемещения. Таким образом, в анализе учитываются радиальная и осевая жесткости подшипников.

В качестве граничных условий для исследуемого модуля используется закрепление с ограничением перемещения и поворотом по всем осям в местах, предусмотренных конструкторской документацией на изделие. Общий вид полученной КЭМ показан на рис. 3.

Для корпусных деталей редукторной сборки используется материал ВТ14. Для элементов зубчатого зацепления в волновой и планетарной передачах используется сталь 95Х18. Для деталей двигателя применяется АМг6. Модуль упругости и коэффициент Пуассона материалов, используемых в расчете, представлены в табл. 1.

.

Таблица 2



188

Рис. 3. Общий вид КЭМ УММ-ИП

	-				
Материал	95X18	АМг6	BT14		
Модуль упругости, Па	2.1011 0,71.1011		1,1.1011		
Коэффициент Пуассона	0,3	0,33	0,36		

Свойства материалов

Таблица 1

Перед проведением динамического анализа проводится статический анализ без задания дополнительных нагрузок для решения контактной задачи в местах зацепления зубчатых передач и пересчета коэффициентов матрицы жесткости, что определяет преднагруженное состояние модели. Пересчет коэффициентов матрицы жесткости необходим, так как в дальнейшем используется линейная динамика, при которой жесткость остается постоянной.

Проводимый далее динамический анализ заключается в определении собственных частот (модального анализа), которые отражают отклик конструкции на внешние механические воздействия, и анализе воздействия на конструкцию синусоидальной и случайной вибраций.

По техническому заданию УММ не должен иметь конструктивных элементов и узлов с резонансными (собственными) частотами ниже 50 Гц.

При проведении динамического анализа величины нагружающих воздействий устанавливались в соответствии с техническими требованиями стойкости к механическим воздействиям, приведенным в табл. 2.

При проведении анализа на воздействие синусоидальной вибрации выполняли три исследования с разными диапазонами частоты и амплитуды воздействия по трем осям координат при помощи

По всем осям координат Нагрузки Частота, Уровень, Γц  $M/c^{2}(g)$ 5-10 ±10 мм от ±39,24 (4) Синусоидальные ви-10-20 брации до ±196,2 (20) 20-100 ±196,2 (20) 20-100 +6 дБ/окт 100-300 0,8 g2/Гц -12 дБ/окт Случайная вибрация 300-360 360-500 0,4 g2/Гц 500-2000 -12 лБ/окт Среднеквадратическое значение ускорения, д 18,6

модуля Harmonic Response. При анализе случайной вибрации проводилось одно исследование по трем осям с помощью модуля Random Vibration. Расположение осей системы координат для УММ-ИП показано на рис. 3.

# 2. Описание результатов расчетов

Полученные результаты рассматриваются при 3 $\sigma$ , что соответствует вероятности 99,72 %. Максимальные значения напряжений и перемещений, полученные при проведении статического анализа, сконцентрированы на гибком колесе волновой передачи. Полученное преднагруженное состояние применяется как начальное состояние для динамического расчета.

### Модальный анализ

Задачей модального анализа является поиск первых 20 колебательных мод (собственных частот). Полученные частоты приведены в табл. 3.

Значения собственных частот передаются в модуль Random Vibration для дальнейшего анализа воздействия случайной вибрации на конструкцию УММ-ИП.

### Анализ влияния синусоидальной вибрации

В ходе анализа влияния синусоидальной вибрации было выявлено, что нагрузка в 1g оказывает минимальное влияние на исследуемый УММ-ИП, в связи с чем графики его амплитудночастотной характеристики (АЧХ) имеют линейный вид при данной нагрузке (рис. 4*a*).

При синусоидальной вибрации на частоте 10–20 Гц и увеличении значения ускорения от 4 до 20g максимальный отклик наблюдается при воздействии ускорения 20g (рис. 46).

#### А.С. Титова, А.С. Саблин, М.А. Загайнов, С.А. Кузнецов

Особенности анализа динамических нагрузок привода вращения механизмов космического аппарата

Таблица 3

Номер	Частота,	Номер	Частота,
моды	Гц	моды	Гц
1	605,32	11	3552
2	861,36	12	3621,2
3	934,76	13	3686,8
4	2599,0	14	3710,1
5	2606,4	15	3877,8
6	2867,7	16	4387,8
7	2967,3	17	4700,5
8	3123,8	18	4798,2
9	3160,4	19	4868,9
10	3354,7	20	5017,9

Собственные частоты

При воздействии нагрузки величиной 20g на частоте 20–100 Гц максимальный отклик наблюдается на частоте 100 Гц (рис. 4*в*).

Значения максимального отклика по каждой оси были зафиксированы при совпадении осей нагрузки и отклика. Графики АЧХ для трех диапазонов представлены на рис. 4.

#### Анализ влияния случайной вибрации

При воздействии случайной вибрации максимальные напряжения сконцентрированы в местах зубчатого зацепления планетарной передачи, как показано на рис. 5, и по осям X, Y составляют 32 МПа, по оси Z – 18 МПа.

В состав исследуемого модуля входит вращающийся трансформатор, для правильной работы которого необходимо обеспечить воздушный зазор между статором и ротором. Несоблюдение воздушного зазора в 1 мм является критичным для точности позиционирования УММ-ИП. В ходе анализа было выявлено, что максимальное перемещение составляет 0,044 мм при воздействии нагрузки по оси Y, следовательно, радиальное перемещение статора и ротора не превышает заданного конструктивного значения. Эпюра распределения перемещений представлена на рис. 6.

#### Заключение

Ось Х

Разработана конечно-элементная модель УММ-ИП с учетом радиальной и осевой жесткости подшипников. По результатам статического анализа изучены контактные напряжения в зуб-



Рис. 4. а – график АЧХ по осям Х, Ү, Z при нагружении ускорением 1g по осям Х, Ү, Z на частоте 5–10 Гц; б – график АЧХ по осям Х, Ү, Z при нагружении ускорением от 4 до 20 g по осям Х, Ү, Z на частоте 10–20 Гц; в – график АЧХ по осям Х, Ү, Z при нагружении ускорением 20g по осям Х, Ү, Z на частоте 20–100 Гц



Рис. 5. Распределение напряжения в месте зубчатого зацепления в планетарной передаче по оси Х



Рис. 6. Эпюра распределения перемещений на детали ротора

чатом зацеплении и скорректированы коэффициенты матрицы жесткости. Проведен анализ динамических нагрузок для исследования стойкости к механическим воздействиям – синусоидальным и случайным вибрационным нагрузкам.

190

По результатам динамического анализа УММ-ИП не имеет собственных частот ниже 50 Гц. По анализу графиков амплитудночастотной характеристики для трех диапазонов частот УММ-ИП является стойким к воздействию синусоидальной вибрации. Полученные данные о перемещениях и возникающих напряжениях в пределах трех среднеквадратичных отклонений, о распределении напряжений по конструкции при воздействии случайной вибрации позволяют сделать вывод, что УММ-ИП является стойким к воздействию случайной вибрации. Воздушный зазор между статором и ротором вращающегося трансформатора не нарушается под действием случайной вибрации, обеспечивается исправная работа элементов УММ-ИП.

## Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта «Создание высокотехнологичного импортозамещающего

#### А.С. Титова, А.С. Саблин, М.А. Загайнов, С.А. Кузнецов

Особенности анализа динамических нагрузок привода вращения механизмов космического аппарата

производства универсальных многофункциональных мехатронных модулей, предназначенных для обеспечения работы исполнительных систем трансформируемых конструкций объектов авиационно-космической техники, обеспечивающей освоение и использование Мирового океана,

многофункцио- Арктики и Антарктики» в БГТУ «ВОЕНМЕХ» предназначен- им. Д.Ф. Устинова при финансовой поддержсполнительных ке Министерства науки и высшего образования укций объектов Российской Федерации (соглашение № 075–11– , обеспечиваю- 2021–057 от 28.06.2021) в соответствии с постановлением Правительства РФ от 09.04.2010 № 218.

## Список литературы

- [1] Сильченко П. Н., Кудрявцев И. В., Михнёв М. М., Халиманович В. И., Наговицин В. Н. Анализ динамического состояния волноводно-распределительных систем от воздействия вибрационных нагрузок на этапе вывода космического аппарата на орбиту // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2012. № 2 (5). С. 205–219.
- [2] Безмозгий И. М., Софинский А. Н., Чернягин А. Г. Моделирование в задачах вибропрочности конструкций ракетно-космической техники // Космическая техника и технологии. 2014. № 3 (6). С. 71–80.
- [3] Wael A.A. Using ANSYS for Finite Element Analysis. Momentum Press, 2018, vol. 2. 240 p.
- [4] Козлова Н. И., Лукин Р. С. Обеспечение вибропрочности приводов космических аппаратов с использованием метода конечных элементов // Решетневские чтения. 2016. Т. 1. С. 447–449.
- [5] Матвеев С.А., Горбунов А.В., Надежин М.И., Толмачев А.С., Ширшов А.Д., Яковенко Н.Г. Прецизионные мехатронные устройства и робототехнические комплексы на их основе // Роботизация Вооружённых Сил Российской Федерации. Сборник статей V военно-научной конференции. Анапа. 2020. С. 201–203.
- [6] Янгулов В.С. Волновые и винтовые механизмы и передачи: учебное пособие // Томский политехнический университет. Томск: Изд-во Томского политехнического университета. 2011. 184 с. ISBN 978–5–98298–822–5.
- [7] Горбунов А. В., Коротков Е. Б., Слободзян Н. С. Высокоточная система наведения и ориентации космических бортовых приборов на базе гексапода с пространственным датчиком положения // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 7. С. 42–47.
- [8] Матвеев С.А., Тестоедов Н.А., Горбунов А.В., Саблин А.С. Междисциплинарный анализ переходных процессов, протекающих при тепловых нагрузках в электронасосном агрегате замкнутой жидкостной системы терморегулирования космического аппарата // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2021. № 4. С. 18–24.
- [9] Горбунов А.В. Исследование напряженно-деформированного состояния крупногабаритной трансформируемой конструкции с системой управления формой // Системный анализ, управление и навигация. Тезисы докладов. 2019. С. 103–105.
- [10] Горбунов А.В., Желтышев О.И., Саблин А.С., Загайнов М.А., Кузнецов С.А. Особенности разработки имитационной модели редукторной сборки привода космического аппарата // Космические аппараты и технологии. 2022. № 4 (42). С. 255–262.

# FEATURES OF DYNAMIC LOAD ANALYSIS OF SPACECRAFT ROTATIONAL DRIVE MECHANISMS

#### A.S. Titova<sup>1</sup>, A.S. Sablin<sup>1</sup>, M.A. Zagainov<sup>1</sup>, S.A. Kuznetsov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D. F. Ustinov, Saint Petersburg, Russian Federation <sup>2</sup>JSC «Academician M. F. Reshetnev» Information Satellite Systems», Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation

An executive precision universal mechatronic module is considered, which allows performing precision rotational motion of the output kinematic link. The universal mechatronic module is designed to create the kinematics of mechatronic guidance systems and positioning of objects of aerospace technology. The key features of the executive precision universal mechatronic module are high positioning accuracy, low weight and overall dimensions. The aim of the work is to



create a finite element model and analyze dynamic loads to assess the resistance of the structure to external vibration loads. The first section describes the creation of a finite element model taking into account the radial and axial stiffness of the supporting structural elements. The second section describes performing static analysis to create a preloaded state, and performing dynamic analysis. The influence of sinusoidal and random vibrations is investigated, the natural frequencies of the universal mechatronic module design are determined.

Keywords: gearbox, drive, spacecraft, finite element method, vibration.

# References

- [1] Silchenko P.N., Kudryavceva I.V., Mikhnevb M.M., Khalimanovich V.I. and Nagovitsin V.N. Dynamic state analysis of waveguide distribution systems from vibration loads effects while launching spacecraft into the orbit // Journal of Siberian Federal University, 2012, vol, 5. no 2, pp. 205–219. (In Russian)
  - [2] Bezmozgiy I. M., Sofinskiy A. N., Chernyagin A. G. The simulation in problems of vibration strength of rocket and space hardware // Space technique and technologies, 2014, no 3 (6), pp. 71–80. (In Russian)
  - [3] Wael A.A. Using ANSYS for Finite Element Analysis. Momentum Press, 2018, vol. 2, 240 p.
  - [4] Kozlova N. I., Lukin R. S. Providing the vibration strength of spacecraft drives with finite element method // Reshetnev readings, 2016, vol. 1, no 20, pp. 447–449. (In Russian)
  - [5] Matveev S.A., Gorbunov A.V., Nadezhin M.I., Tolmachev A.S., Shirshov A.D., Yakovenko N.G. Precision mechatronic devices and robotic complexes based on them // In the collection: Robotization of the Armed Forces of the Russian Federation. Collection of articles of the V military-scientific conference. Anapa, 2020, pp. 201–203.
  - [6] Yangulov V. S. Wave and screw mechanisms and gears: textbook // Tomsk Polytechnic University. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2011, 184 p. ISBN 978–5–98298–822–5
  - [7] Gorbunov A. V., Korotkov E. B., Slobodzyan N. S. High-precision space on-board instruments aiming and orientation system of the hexapod with a spatial position sensor // Questions of radio electronics, 2017, no 7, pp. 42–47.
  - [8] Matveev S.A., Gorbunov A.V., Sablin A.S., Testoedov N.A. Interdisciplinary analysis of transient processes in the electric pump unit of the liquid thermal control system of the spacecraft // News of higher educational institutions. Aviation technology, 2021, no 4, pp. 18–24.
- [9] Gorbunov A. V. Analysis of a stressed-deformed state of a large-sized developed construction with a form control system. // System Analysis, control and navigation. Abstracts of reports, 2019, pp. 103–105.
- [10] Gorbunov A. V., Zheltyshev O. I., Sablin A. S., Zagainov M. A., Kuznetsov S. A. Features of the development of a simulation model of the gearbox assemby of the spacecraft drive // Spacecrafts & Technologies, 2022, vol. 6, no 4 (42), pp. 255–262. (In Russian)

# Сведения об авторах

Титова Анастасия Сергеевна – техник опытно-конструкторского бюро Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова. Студент 5-го курса специалитета Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова. Область научных интересов: физическое и математическое моделирование.

Саблин Андрей Сергеевич – инженер 1 категории опытно-конструкторского бюро Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова. Окончил специалитет Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова в 2019 году. Область научных интересов: физическое и математическое моделирование.

Загайнов Максим Александрович – инженер 2 категории опытно-конструкторского бюро Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова. Окончил магистратуру Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова в 2022 году. Область научных интересов: физическое и математическое моделирование.

Кузнецов Станислав Александрович – кандидат физико-математических наук, начальник отдела инновационного развития АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва. Окончил специалитет Сибирского федерального университета в 2007 году, магистратуру Сибирского федерального университета в 2016, аспирантуру Томского государственного университета в 2020 году. Область научных интересов: системный анализ, физическое и математическое моделирование. УДК 629.783 004.94 DOI 10.26732/j.st.2023.3.03

# КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ БОРТОВОГО РЕТРАНСЛЯЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ АНАЛИЗА ФАЗОВЫХ ИСКАЖЕНИЙ СИГНАЛА

# А.В. Шагов, В.В. Сухотин, Т.А. Зубов

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация

В статье рассмотрены вопросы, связанные с разработкой компьютерной модели бортового ретрансляционного комплекса с линейной ретрансляцией сигнала для анализа его фазовых искажений. Очень важным является знание фазовых искажений (набега) при определении координат источника радиоизлучения фазовым методом с использованием виртуальной антенной решётки в системах спутниковой связи. Обзор литературы, приведенный в статье, показал отсутствие возможности провести указанные исследования на существующих компьютерных моделях. На основе классического варианта структурной схемы бортового ретрансляционного комплекса была разработана компьютерная модель в среде МАТLAB R 2016b (Simulink). В состав модели вошли приёмное устройство, входной и выходной мультиплексоры и усилители мощности. В качестве нелинейных усилителей были взяты математические модели Салеха и Горбани усилителей, реализованных на лампах бегущей волны, и твердотельных усилителей соответственно. Мультиплексоры реализованы в виде полосовых фильтров, подключенных параллельно. Гибридный делитель и ферритовые циркуляторы не вошли в модель. В модели есть возможность исследовать зависимость фазовых искажений сигнала от характеристик структурных блоков бортового ретрансляционного комплекса. Также в компьютерной модели предусмотрена возможность исследования влияния шума на фазовые искажения.

Ключевые слова: геостационарная орбита, фазовые искажения, шумы, модель, транспондер.

# Введение

Бортовой ретранслятор, полезная нагрузка на космическом аппарате (КА), представляет собой комплекс, состоящий из: приёмного и передающего антенно-фидерного устройства (АФУ), приёмного устройства, усилителей мощности (УМ), входной и выходной матриц резервирования, входного (IMUX) и выходного (OMUX) мультиплексора. Классический вариант структурной схемы бортового ретрансляционного комплекса (БРК) [1] представлен на рис. 1.

Как видно из рисунка, происходит линейная ретрансляция сигнала, что дает возможность решить задачу определения координат источника радиоизлучения (ИРИ) с применением спутниковых систем связи фазовым методом [2] с использованием виртуальной антенной решётки [3], однако важно знать и учитывать набег фазы в БРК. Например, при решении навигационной задачи на основе фазовых измерений, учитывая фазовые искажения, погрешности определения относительных координат могут быть достигнуты порядка нескольких миллиметров [4].

Целью работы стала разработка виртуальной модели БРК космического аппарата с линейной ретрансляцией на геостационарной орбите для анализа фазовых искажений ретранслируемого сигнала.

Задачами явились обзор существующих аналогов и разработка компьютерной модели БРК без учета влияния ферритовых циркуляторов и гибридных делителей на искажение фазы.

# 1. Обзор существующих компьютерных моделей

БРК со сквозной ретрансляцией выполняет функцию приема сигналов от наземных земных станций, усиления этих сигналов и передачи их на другие земные станции.

Первые поколения советских и российских БРК были построены на основе СВЧ-приёмопередатчика по супергетеродинному принципу [5]. УМ уже тогда строились на ЛБВ. Но такой подход имел ряд недостатков, среди которых большая масса и габариты.

<sup>🖂</sup> vsuhotin@sfu-kras.ru

<sup>©</sup> Ассоциация «ТП «НИСС», 2023



Рис. 1. Структурная схема бортового ретрансляционного комплекса с п-стволами



Рис. 2. Блок-схема БРК «Ямал-100»

На рис. 2 представлена принципиально новая схема построения БРК [1, 5], которая была использована при создании БРК «Ямал-100».

В [5] рассматривается история создания БРК «Ямал» и обращается внимание на то, что он получил принципиально новую схему построения, что является прорывным этапом в построении отечественных КА. Представленная структурная схема соответствует исследуемой и будет использована при моделировании, но с учётом некоторых правок. Впоследствии в качестве УМ стали использовать УЛБВ и твердотельный предусилитель, который также необходимо учитывать при исследовании фазовых искажений.

Усилители на ЛБВ БРК КА «Ямал-200» были существенно доработаны: КПД увеличен до 50 %, ресурс составляет 10–15 лет, на входе УЛБВ внедрены твердотельные усилители, что позволило получить усиление до 70–80 дБ, и другие изменения. Данная модель является аналогичной исследуемой, но в этой работе рассматриваются принципы построения БРК и не затрагиваются темы амплитудных/частотных искажений при прохождении сигнала через ретранслятор.

Аналогом можно считать моделирование передачи диагностирующих сигналов через загруженный ретранслятор с нелинейной передаточной характеристикой [6]. Целью данной работы было моделирование диагностических сигналов для определения необходимых характеристик БРК и мониторинг состояния его загруженности.

На рис. 3 представлена структура системы для моделирования передачи диагностирующих сигналов.

Данная модель направлена на решение задач диагностики БРК и не рассматривает его структурную схему и влияние отдельных блоков на изменения фазы сигнала, вносимые ретранслятором. Также не раскрывается подробная схема ретран-



Рис. 3. Структура системы для моделирования передачи диагностирующих сигналов [6]

слятора, следовательно, использовать эту работу для оценки фазовых искажений сигнала при прохождении через БРК не представляется возможным. Рассмотрим ещё один аналог.

Научная статья [7], описывающая основные положения для построения компьютерной модели БРК с целью анализа искажений сигнала при его ретрансляции БРК. В этой работе рассматривается типовая структура современного многоствольного БРК, представленная на рис. 1. Работа описывает прохождение сигнала от передающей наземной станции к приёмной наземной станции через БРК.

Следует отметить, что структурная схема, представленная на рис. 1, соответствует исследуемой и рассматривается в [1, 5, 7].

Компьютерная модель БРК из научной статьи представлена на рис. 4.

ты, которые искажают фазу сигнала. Основное влияние оказывают фильтры и усилители, они и будут рассмотрены более подробно.

Один из основных элементов бортового ретранслятора – это усилитель на лампе бегущей волны. Поскольку в данных усилителях основой является электронный поток, который модулируется по закону входного сигнала, такой усилитель меняет фазу сигнала. Типовые передаточные характеристики УЛБВ, используемые на современных космических аппаратах [8], и передаточная характеристика усилителя по модели Салеха (теоретическая) представлены на рис. 5.

Помимо амплитудных передаточных характеристик, рассматриваемых в [8], существуют также и фазовые передаточные характеристики, которые не анализируются в данном источнике.



Рис. 4. Структура компьютерной модели для оценки влияния параметров БРК на сигнал

В основе рассматриваемой работы поставлена задача формирования ряда требований, необходимых для корректного моделирования и дальнейшего применения этих исследований.

Структурная схема на рис. 4 описывает путь прохождения сигнала через БРК, и результатом исследования должен быть анализ вероятности появления ошибки в принятом сигнале.

Целью данной работы было формирование принципов построения корректной компьютерной модели тракта прохождения сигнала от одной НС к другой через БРК. Модель должна отражать физические принципы передачи сигнала и учитывать различные характеристики системы. Мы можем использовать в своей работе некоторые сформированные требования, поскольку разрабатываем модель только БРК. Поскольку в данной работе не реализовано моделирование, мы не можем выполнить исследования, используя готовую модель, и будем создавать свою.

## 2. Компьютерная модель бортового ретрансляционного комплекса для анализа фазовых искажений сигнала

Большинство элементов, используемых в ретрансляторах КА, имеют общие типовые элемен-



Рис. 5. Типовые амплитудные передаточные характеристики УЛБВ

В рамках нашей модели нам необходимо учесть набег фазы, создаваемый усилителем на ЛБВ, соответственно, данную модель мы не можем использовать, так как в ней рассматриваются только амплитудные передаточные характеристики.

Также существуют модели, где оцениваются искажения усилителей на ЛБВ при различных значениях частоты и напряжения пучка [9]. В результате данного исследования авторы показывают, что возможно создание усилителя на ЛБВ со стабильным сдвигом фазы, которое может найти широкое применение в радиолокации.

Данное исследование показывает, что в дальнейшем возможно создание фазостабильных усилителей на ЛБВ, но для нашей модели также не подходит, так как нам необходимо учитывать





4 – эксперимент экспериментального образца; 5 – расчет прибора с укороченной входной секцией

искажения, вносимые уже применяемыми усилителями.

Существуют разные модели, позволяющие выполнить аппроксимацию передаточных характеристик различных усилителей, которые рассматриваются в [10]. Для усилителей на ЛБВ наиболее подходящей является модель Салеха, разработанная А. Салехом [11]. Передаточные характеристики усилителя задаются двумя характеристиками – амплитудной (1) и фазовой (2).

$$G(A) = \frac{a_0 A}{1 + a_1 A^{2'}} \tag{1}$$

$$\varphi(A) = \frac{b_0 A^2}{1 + b_1 A^2},\tag{2}$$

где  $a_0, a_1, b_0, b_1$  – амплитудные и фазовые коэффициенты, A – амплитуда входного сигнала (A = 1 – точка насыщения).

На основе данных из [10, 11, 12] мы можем использовать эту модель для усилителя на ЛБВ, приняв соответствующие коэффициенты равными, получая СКО в 0,01 по амплитуде и 0,469 по фазе [10,13].

Данный метод нам подходит и позволяет учесть искажение фазы усилителем в составе модели, так как рассмотрена не только амплитудная передаточная характеристика, но и фазовая.

Поскольку современные усилители имеют твердотельные предусилители мощности, необходимо учесть их влияние на фазовые искажения. Для твердотельных усилителей хорошо подходит модель Горбани, описанная также в [10] и [13]. Модель описывается амплитудной (3) и фазовой (4) передаточными функциями.

$$G(A) = a_3 A + \frac{a_0 A^{a_1}}{1 + a_2 A^{a_1}},$$
 (3)

$$\varphi(A) = b_3 A + \frac{b_0 A^{b_1}}{1 + b_2 A^{b_1}},\tag{4}$$

где  $a_0, a_1, a_2, a_3$  – амплитудные, а  $b_0, b_1, b_2, b_3$  – фазовые коэффициенты передаточных функций нелинейных усилителей по модели Горбани. Будут использованы стандартные коэффициенты:

 $a_0 = 8,1081; a_1 = 1,5413; a_2 = 6,5202; a_3 = -0,0718 -$ для амплитудной и  $b_0 = 4,6645; b_1 = 2,09565;$  $b_2 = 10,88; b_3 = -0,003 -$ для фазовой передаточной характеристики. Коэффициенты также впоследствии могут быть скорректированы для конкретного устройства.

Изучив общие принципы построения БРК в [1], был рассмотрен ряд публикаций на данные темы [5–13]. В основе компьютерной модели БРК лежит структурная схема, представленная на рис. 1, 2. Каждый блок раскрывается более подробно в соответствии с составом БРК, описанным в [1].

На рис. 7 приведена структурная схема приёмного устройства.



Рис. 7. Структурная схема приёмного устройства БРК

На входе ретранслятора стоит полосовой фильтр (ПФ) С-диапазона.

Приёмное устройство состоит из малошумящего усилителя (МШУ), преобразователя частоты (ПРЧ) с гетеродином (ГЕТ) и оконечного усилителя (ОУ). Источник вторичного питания не будет входить в состав данной модели, так как рассматривается только тракт прохождения сигнала. Вторичный источник питания (ВИП) в данной модели анализироваться не будет.

Далее по схеме после приёмного устройства сигнал поступает на входной мультиплексор, представленный на рис. 8.

В компьютерной модели мультиплексор реализован с помощью полосовых фильтров, подключенных параллельно. Гибридный делитель и ферритовые циркуляторы не учитываются согласно заданию.

Выходной мультиплексор также состоит из набора полосовых фильтров и будет смоделиро-

196

Компьютерная модель бортового ретрансляционного комплекса для анализа фазовых



Рис. 8. Структурная схема типового мультиплексора в БРК на 8 каналов

ван. Пример выходного мультиплексора показан на рис. 9.

Усилители мощности состоят из предусилителей на твердотельных элементах и усилителей мощности на лампе бегущей волны. Для оценки фазовых искажений будут использованы математические модели Горбани и Салеха соответственно.

Объединив всё изложенное, была разработана компьютерная модель БРК, представленная на рис. 10. Моделирование производилось в программной среде MATLAB R 2016b (Simulink). Далее приведено подробное описание всех элементов схемы и задаваемые параметры.



Рис. 9. Структурная схема выходного мультиплексора БРК

Для AM/AM и AM/ФМ преобразования сигнала при прохождении через усилитель сигнал необходимо представить в комплексной форме. Реализован блок преобразования гармонических колебаний в комплексную форму, схема которого указана на рис. 11.

Схема рассчитана на гармоническое колебание на входе. Функция *arcsin* определяет аргумент гармонического сигнала, далее из него формируются sin и cos составляющие путём сдвига

сигнала во времени на  $\frac{T}{4}$  и умножения синусной составляющей на мнимую единицу. После этого



Рис. 10. Структурная схема компьютерной модели



Рис. 11. Схема преобразования сигнала в комплексный вид



косинусные и синусные составляющие складываются, и полученный комплексный сигнал проходит дальше. Схема этого преобразования представлена на рис. 12.



Рис. 12. Схема преобразования сигнала из комплексной формы в действительную

Входной гармонический комплексный сигнал поступает на блок «Complex to Magnitde-Angle», где вычисляется его модуль и аргумент, далее модуль сигнала умножается на синус его аргумента и на выходе остаётся только реальный гармонический сигнал.

Для исследования характеристик твердотельных усилителей мощности воспользуемся моделью Горбани. Схема для снятия переходных характеристик представлена на рис. 13. входной амплитуде  $0-0,5 \cdot 10^{-3}$  В. Поэтому будет использована такая же модель, но собранная самостоятельно. Схема модели показана на рис. 14.

Коэффициенты передаточных функций идентичны встроенной в ПО модели, как и сами функции. Данные коэффициенты являются стандартными для исследования твердотельных усилителей и совпадают с рассмотренными в [10, 13]. Для нормирования входных и выходных амплитуд сигнала параметры  $K_{in} K_{out}$  объявлены переменными, что позволяет в дальнейшем при исследованиях менять их, не раскрывая каждый раз подробную схему усилителя.

Полученные передаточные характеристики исправленной модели Горбани соответствуют теоретическим, следовательно, ошибка встроенной модели исправлена.

Преобразователь частоты в компьютерной модели реализован с помощью перемножения входного гармонического колебания и стабильно-го колебания (гетеродина) с частотой 2325 МГц



Рис. 13. Структурная схема исследования характеристик модели Горбани



Рис. 14. Структурная схема исследования характеристик модели Горбани, реализованная через передаточные функции АМ/АМ и АМ/ФМ

На входе данной схемы формируется комплексный сигнал. Действительная часть является амплитудой и линейно нарастает для получения передаточной функции. Мнимая часть равна нулю и соответствует фазе входного сигнала. Сформированный комплексный сигнал поступает на вход математической модели Горбани, описывающей УМ, построенные на твердотельных элементах. На выходе также получаем комплексный сигнал, из которого вычисляем его амплитуду и фазу. Для удобства восприятия значения фазы

переведём в градусы, умножив на 
$$\frac{180}{\pi}$$
.

На передаточных характеристиках встроенной готовой модели было замечено несоответствие графика АМ/ФМ преобразования в области времени 0–25 · 10<sup>-4</sup>, что соответствует

. . .

и полосовым фильтром на выходе для подавления комбинационных составляющих преобразователя частоты. Частота гетеродина 2325 МГц взята из технических характеристик структурнофункциональных блоков БРК, представленных в [1]. Схема преобразователя частоты приведена на рис. 15



Рис. 15. Структурная схема преобразователя частоты

198

#### Компьютерная модель бортового ретрансляционного комплекса для анализа фазовых

Усилители на ЛБВ будут исследованы при помощи модели Салеха. Модель Салеха описывает движение электрически заряженных частиц под действием электрического поля в вакууме. Схема анализа передаточных характеристик модели Салеха представлена на рис. 16.

вый набег через всю систему БРК по ФЧХ и передаточным характеристикам.

#### Заключение

Таким образом, проведенный обзор анало-





№ канала	<b>Fн, МГц</b>	Fв, МГц
1	3492	3492 + 72 = 3564
2	3564 - 1.25 = 3562.75	3564 - 1.25 + 72 = 3634.75
3	$3564 - 1.25 \cdot 2 + 72 = 3633.5$	$3564 - 1.25 \cdot 2 + 72 \cdot 2 = 3705.5$
4	$3564 - 1.25 \cdot 3 + 72 \cdot 2 = 3704.25$	$3564 - 1.25 \cdot 3 + 72 \cdot 3 = 3776.25$
5	$3564 - 1.25 \cdot 4 + 72 \cdot 3 = 3775$	$3564 - 1.25 \cdot 4 + 72 \cdot 4 = 3847$
6	$3564 - 1.25 \cdot 5 + 72 \cdot 4 = 3845.75$	$3564 - 1.25 \cdot 5 + 72 \cdot 5 = 3917.75$
7	$3564 - 1.25 \cdot 6 + 72 \cdot 5 = 3916.5$	$3564 - 1.25 \cdot 6 + 72 \cdot 6 = 3988.5$
8	$3564 - 1.25 \cdot 7 + 72 \cdot 6 = 3987.25$	$3564 - 1.25 \cdot 7 + 72 \cdot 7 = 4059.25$
9	$3564 - 1.25 \cdot 8 + 72 \cdot 7 \!=\! 4058$	$3564 - 1.25 \cdot 8 + 72 \cdot 8 = 4130$

Рис. 17. Расчёт граничных частот ПФ мультиплексоров

Выбраны стандартные для ЛБВ коэффициенты передаточных функций. В дальнейшем данные коэффициенты могут быть изменены на фактически измеренные для конкретного устройства.

При моделировании входного и выходного мультиплексора был взят частотный диапазон структурно-функциональных блоков БРК 3492 МГц – 4130 МГц [1]. Во всём диапазоне 9 каналов по 72 МГц, которые перекрываются между собой полосой в 1,25 МГц.

В таком случае расчёт граничных частот фильтров представлен на рис. 17.

При постоянной частоте и уровне входного сигнала мы можем определить его полный фазо-

# структурно-функциональных узлов БРК, представленных в [1], показал актуальность разработки. В результате создана копьютерная модель БРК в среде MATLAB R 2016b (Simulink) для анализа фазовых искажений сигнала, в состав которой вошли приёмное устройство, входной мультиплексор, усилитель мощности и выходной мультиплексор.

гов [5–13] и анализ технических характеристик

## Благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (номер FSRZ-2023-0008).

#### Список литературы

- [1] Орлов А.Г., Севастьянов Н. Н. Бортовой ретрансляционный комплекс (БРК) спутника связи. Принципы работы, построение, параметры / науч. ред. В. Н. Бранец. Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2014. 206 с.
- [2] Метод определения координат радиопередатчика с использованием геостационарного искусственного спутника Земли / А.С. Калашникова, В.В. Сухотин, О.В. Адмаев, Е.О. Смольников // Журнал Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 10. С. 117–119.
- [3] Kalashnikova A.S., Sukhotin V.V. Consideration of Methods to Protect Frequency Resources of Satellite System Against Unauthorized Access. 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. - Omsk: Omsk State Technical University. Russia, Omsk. May 21-23, 2015. IEEE Catalog Number: CFP15794-CDR. ISBN: 978-1-4799-7102-2. 10.1109/SIBCON.2015.7147083



- [4] Тяпкин В. Н., Гарин Е. Н. Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС: монография. Красноярск: Сибирский федеральный университет. 2012. 260 с.
- [5] Севастьянов Н.Н. Создание отечественных спутников связи «Ямал» // Доклады ТУСУРа. 2017. Т. 20, № 1. С. 149–153.
- [6] Буров Р.И., Илларионов Б.В., Малиев Д.С. Моделирование передачи диагностирующих сигналов через загруженный ретранслятор с нелинейной передаточной характеристикой // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16, № 3. С. 79–86.
- [7] Зубов Т. А., Баскова А. А., Сухотин В. В. Формирование структуры компьютерной модели для оценки влияния параметров бортового ретрансляционного комплекса на сигнал // Космические аппараты и технологии. Ракетно-космическая техника. 2018. Т. 2 № 4. С. 192–197.
- [8] Сорокатый Р. Э., Яковлев А.Ю. Анализ нелинейных искажений сигналов в усилителях на лампах бегущей волны // Решетнёвские чтения, 2014. С. 34–36.
- [9] Кудряшов А.Г., Кудряшов В.П., Сивяков Б.К. Исследование характеристик фазостабильной лампы с бегущей волной // Вестник СГТУ. Физика, радиотехника и электроника. 2014. № 4. С. 55–60.
- [10] Гуревич В.Э., Егоров С. Г. Моделирование амплитудной характеристики радиотракта с кодовым разделением каналов// Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 2. С. 30–38. DOI:10.31854/1813–324X-2020–6–2–30–38.
- [11] Saleh A.A.M. Frequency-Independent and Frequency–Dependent Nonlinear Models of TWT Amplifiers // IEEE Transactions on Communications. 1981. Vol. COM 29, № 11. pp. 1715–1720. DOI:10.1109/TCOM.1981.1094911.
- [12] White G.P., Burr A.G., Javornik T. Modelling of nonlinear distortion in broadband fixed wireless access systems // Electronics Letters. 2003. Vol. 39. Iss. 8. pp. 686–687. DOI:10.1049/el:20030462.
- [13] Ghorbani A. and Sheikhan M. The effect of solid state power amplifiers (SSPAs) nonlinearities on MPSK and M-QAM signal transmission // Sixth International Conference on Digital Processing of Signals in Communications. Loughborough, UK. 1991. pp. 193–197.

# COMPUTER MODEL OF THE TRANSPONDER FOR THE ANALYSIS OF PHASE DISTORTIONS OF THE SIGNAL

# A.V. Shagov, V.V. Sukhotin, T.A. Zubov Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

The article discusses issues related to the development of a computer model of an on-board relay complex with linear signal retransmission for the analysis of phase distortion of the signal. It is very important to know the phase distortion (foray) when determining the coordinates of the radio source by the phase method using a virtual antenna array in satellite communication systems. The literature review given in the article showed that it was not possible to conduct these studies on existing computer models. Based on the classical version of the block diagram of the on-board relay complex, a computer model was developed in the MATLAB R 2016b (Simulink) environment. The model includes a receiving device, an input and output multiplexer and power amplifiers. Mathematical models of Saleh and Gorbanni amplifiers implemented on traveling wave lamps and solid-state amplifiers, respectively, were taken as nonlinear amplifiers. Multiplexers are implemented in the form of bandpass filters connected in parallel. The hybrid divider and ferrite circulators were not included in the model. In the model, it is possible to investigate the dependence of the phase distortion of the signal on the characteristics of the structural blocks of the on-board relay complex. The computer model also provides for the possibility of studying the effect of noise on phase distortion.

Keywords: geostationary orbit, phase distortion, noise, model, transponder.

200

Компьютерная модель бортового ретрансляционного комплекса для анализа фазовых

# References

- Orlov A. G., Sevastyanov N. N. On-board relay complex (DBK) of a communication satellite. Principles of operation, construction, parameters / scientific ed. V. N. Branets. Tomsk: Publishing House of Tomsk State University, 2014. 206 p.
- [2] A method for determining the coordinates of a radio transmitter using a geostationary artificial satellite of the Earth / A. S. Kalashnikova, V. V. Sukhotin, O. V. Admaev, E. O. Smolnikov // Journal of Successes of modern radio electronics. 2015. No. 10. pp. 117–119.
- [3] Kalashnikova A. S., Sukhotin V.V. Consideration of Methods to Protect Frequency Resources of Satellite System Against Unauthorized Access. 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. -Omsk: Omsk State Technical University. Russia, Omsk. May 21–23, 2015. IEEE Catalog Number: CFP15794-CDR. ISBN: 978–1–4799–7102–2. 10.1109/SIBCON.2015.7147083
- [4] Tyapkin V. N., Garin E. N. Methods for determining the navigation parameters of mobile vehicles using the GLONASS satellite radio navigation system. Krasnoyarsk: Siberian Federal University. 2012. 260 p.
- [5] Sevastyanov N.N. Creation of domestic communication satellites "Yamal" // Reports of TUSUR. 2017. Vol. 20. No. 1. pp. 149–153.
- [6] Burov R. I., Illarionov B. V., Maliev D. S. Modeling of transmission of diagnostic signals through a loaded repeater with a nonlinear transfer characteristic // Bulletin of the Voronezh State Technical University. 2020. Vol. 16. No. 3. pp. 79–86.
- [7] Zubov T.A., Baskova A.A., Sukhotin V.V. Formation of the structure of a computer model for assessing the influence of parameters of an on-board relay complex on the signal // Spacecraft and technologies. Rocket and space technology. 2018. Vol. 2. No. 4. pp. 192–197.
- [8] Sorokaty R. E., Yakovlev A. Yu. Analysis of nonlinear signal distortions in amplifiers on traveling wave lamps // Reshetnev Readings. 2014. pp. 34–36.
- [9] Kudryashov A. G., Kudryashov V. P., Sivyakov B. K. Investigation of the characteristics of a phase-stable traveling wave lamp // Bulletin of SSTU. Physics, radio engineering and electronics. 2014. No. 4. pp. 55–60.
- [10] Gurevich V. E., Egorov S. G. Modeling of the amplitude characteristics of a radio tract with code separation of channels // Proceedings of educational institutions of Communications. 2020. Vol. 6. No. 2. pp. 30–38. DOI:10.31854/1813– 324X-2020-6-2-30–38.
- [11] Saleh A.A. M. Frequency-Independent and Frequency–Dependent Nonlinear Models of TWT Amplifiers // IEEE Transactions on Communications. 1981. Vol. COM 29, № 11. pp. 1715–1720. DOI:10.1109/TCOM.1981.1094911.
- [12] White G.P., Burr A.G., Javornik T. Modelling of nonlinear distortion in broadband fixed wireless access systems // Electronics Letters. 2003. Vol. 39. Iss. 8. pp. 686–687. DOI:10.1049/el:20030462.
- [13] Ghorbani A. and Sheikhan M. The effect of solid state power amplifiers (SSPAs) nonlinearities on MPSK and M-QAM signal transmission // Sixth International Conference on Digital Processing of Signals in Communications. Loughborough, UK. 1991. pp. 193–197.

# Сведения об авторах

Шагов Андрей Владимирович – студент 6-го курса СФУ. Область научных интересов: моделирование радиотехнических устройств.

Сухотин Виталий Владимирович – доцент СФУ, канд. техн. наук. Окончил КГТУ в 1999 году. Область научных интересов: измерения параметров сигналов в радиотехнике, радиотехнические методы измерения координат источников радиоизлучения.

Зубов Тимур Александрович – ассистент СФУ. Окончил СФУ в 2016 году. Область научных интересов: цифровые системы связи, встраиваемые системы и системы автоматизации.

201

УДК 629.78.01 DOI 10.26732/j.st.2023.3.04

# РАЗРАБОТКА СПОСОБА РАЗДЕЛЕНИЯ РАДИООТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КРУПНОГАБАРИТНОГО РЕФЛЕКТОРА НА ВЫКРОЙКИ ИЗ СЕТЕПОЛОТНА С КРУПНОЙ ЯЧЕЙКОЙ

# А.В. Иванов, К.А. Кушнир, М.С. Симонова

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

Важный элемент конструкции рефлекторов космических антенн – отражающая поверхность. В настоящее время в качестве отражающей поверхности наиболее часто используется металлизированное трикотажное сетеполотно, которое полностью отвечает требованиям по физико-механическим свойствам, предъявляемым к таким поверхностям. Для крупногабаритных рефлекторов особенно важны такие параметры, как малая удельная масса и высокий коэффициент светопропускания, которые обеспечивает сетеполотно с увеличенным размером ячеек. Однако структурные особенности такого сетеполотна накладывают дополнительные требования к его использованию в качестве отражающей поверхности для крупногабаритных трансформируемых рефлекторов. В статье рассматривается особый подход к проектированию выкроек для отражающей поверхности из сетеполотна с крупной ячейкой. Сформулированы критерии, в соответствии с которыми велась разработка варианта раскроя, позволяющего получить отражающую поверхность с наименьшими искажениями. Авторами предложен способ получения выкроек сетеполотна, описаны преимущества разработанного варианта перед классическим. Выполнен раскрой параболической поверхности для офсетного рефлектора. Проведен анализ предложенного варианта раскроя, а также его оптимизация, которая позволила сохранить целостность ячеистой структуры выкроек вдоль одного петельного ряда. Полученные результаты показывают, что разработанный вариант раскроя полностью соответствует поставленным требованиям и может использоваться для формирования отражающей поверхности из сетеполотна с крупноячеистой структурой.

Ключевые слова: крупногабаритный рефлектор, металлическое сетеполотно, радиоотражающая поверхность, раскрой, крупноячеистая структура, бочкообразность.

# Введение

Создание систем спутниковой связи требует разработки антенн с трансформируемыми рефлекторами, радиоотражающая поверхность которых выполнена из металлического трикотажного сетеполотна [1–4]. Петельная структура трикотажа в совокупности со свойствами металлических нитей обеспечивает хорошую эластичность, электропроводность, малую удельную массу и достаточную прочность в условиях космической среды [5–6].

В крупногабаритных рефлекторах действующие на большую площадь отражающей поверхности силы солнечного давления могут оказывать существенные возмущающие моменты на косми-

ческий аппарат [7]. Для снижения воздействия этого фактора было разработано сетеполотно с увеличенным размером ячеек, которое обеспечивает высокий интегральный коэффициент светопропускания  $\tau s \ge 0.97$  [8].

Кроме того, сетеполотно, представленное на рис. 1, обладает хорошими радиоотражающими свойствами при небольшом рабочем усилии натяжения  $\sigma=2r/cm$ , что позволит при создании отражающей поверхности из такого материала снизить воздействие на приводные устройства рефлектора и тем самым повысить надежность раскрытия [11–12].

Поскольку на современных основовязальных машинах можно получить сетеполотна с шириной от 2 до 6 м, то отражающая поверхность крупногабаритных рефлекторов представляет собой соединенные друг с другом выкройки сетеполотна [8].

<sup>🖂 2481</sup>ghj@mail.ru

<sup>©</sup> Ассоциация «ТП «НИСС», 2023

Разработка способа разделения радиоотражающей поверхности крупногабаритного рефлектора



Рис. 1. Образец трикотажного сетеполотна с крупной ячейкой: 1 – петельный ряд; 2 – петельный столбик

Существующий способ создания выкроек для сетеполотна с мелкоячеистой структурой заключается в разделении отражающей поверхности на сегменты, параллельные оси симметрии рефлектора с последующей их разверткой в плоское состояние [6]. Такой вариант раскроя позволяет получить минимальное количество соединительных швов, что снижает трудоемкость и время изготовления отражающей поверхности рефлектора.

Однако большие размеры ячейки в совокупности с низким рабочим усилием натяжения делают невозможным использование классического способа раскроя отражающей поверхности рефлектора для сетеполотна с крупноячеистой структурой.

## 1. Постановка задачи

Поскольку в местах соединения выкроек из сетеполотна с крупной ячейкой предполагается использование текстильных лент, а рабочее усилие натяжения сетеполотна незначительное, то при раскрытии рефлектора сетеполотно в зоне соединительных швов полностью расправляться не будет. Избежать этой проблемы можно путем совмещения швов сетеполотна со шнурами формообразующей структуры (ФОС), натяжение которых значительно выше. Поэтому разрабатываемый способ раскроя отражающей поверхности должен иметь минимальное количество швов, не подкрепленных шнурами ФОС.

Для достижения необходимых показателей равнопрочности и светопропускной способности сетеполотна в рабочем состоянии необходимо обеспечить одинаковую форму и линейные размеры ячеек под действием постоянного двухосного натяжения, действующего вдоль петельных рядов и столбиков [8–10]. С целью выполнения этих условий непосредственно в конструкции рефлектора разрабатываемый способ раскроя отражающей поверхности должен обеспечивать расположение ячеек в направлении основных усилий, возникающих в сетеполотне.

Разработку учитывающего заданные требования способа раскроя отражающей поверхности из крупноячеистого сетеполотна будем проводить для офсетного зонтичного рефлектора, фронтальная сеть ФОС которого состоит из десяти кольцевых шнуров и восьми радиальных лент. При этом рассмотрим самый худший случай, когда ширина сетеполотна в стадии поставки минимальная и составляет 2 м под действием рабочей нагрузки. Конфигурация отражающей поверхности со шнурами фронтальной ФОС рассматриваемого рефлектора представлена на рис. 2.

# 2. Сравнение вариантов раскроя

Для того чтобы увидеть все преимущества разработанного способа раскроя отражающей поверхности рефлектора, проведем сравнительный анализ существующего и предлагаемого вариантов раскроя.

Отражающая поверхность при классическом раскрое делится на сегменты, параллельные оси симметрии рефлектора, которые затем соединяются в цельную конструкцию. Такой вариант раскроя позволяет получить минимальное количество швов, соединяющих между собой выкройки сетеполотна. Однако, учитывая крупноячеистость сетеполотна, для последующего закрепления отражающей поверхности к шнурам ФОС потребуется пришивка дополнительных конструктивных элементов в виде трикотажных лент, что увеличит трудоемкость и время изготовления рефлектора в целом. Схема классического раскроя показана на рис. 3, где для полной демонстрации главного недостатка этого способа наложены шнуры и ленты фронтальной ФОС.

Поскольку в конструкции фронтальной ФОС рассматриваемого рефлектора преобладают кольцевые шнуры, а основными направлениями усилий, возникающих в сетеполотне, являются радиальное и кольцевое [13–14], был разработан способ раскроя, представленный на рис. 4. При таком раскрое отражающая поверхность формируется из секторов, которые разделены на сегменты, расположенные вдоль кольцевых шнуров ФОС.

Сравнение рассмотренных вариантов раскроя по ключевым критериям представлено в табл. 1.

### 3. Реализация предлагаемого варианта раскроя

Определяющим фактором при новом способе разделения отражающей поверхности на выкройки является положение кольцевых шнуров,



204

Рис. 2. Отражающая поверхность офсетного зонтичного рефлектора: № 1-№ 4 – сектора рефлектора; 1 – кольцевые шнуры ФОС; 2 – радиальная лента ФОС;

3 - система координат теоретического параболоида



Рис. 3. Схема классического способа раскроя отражающей поверхности



Рис. 4. Схема предложенного способа раскроя отражающей поверхности

Таблица 1

Сравнение вариантов раскроя
-----------------------------

Вариант раскроя	+	-	
Классический		Почти все соединительные швы не подкре- плены шнурами ФОС	
	териала	Растяжение ячеек сетеполотна происходит неравномерно	
		Большое количество швов	
Разработанный	Все соединительные швы подкреплены шнурами ФОС		
	Растяжение ячеек сетеполотна происходит равномерно	коэффициент использования материала меньше	
	Наименьшее количество швов		

#### А.В. Иванов, К.А. Кушнир, М.С. Симонова

#### Разработка способа разделения радиоотражающей поверхности крупногабаритного рефлектора

поэтому в системе автоматизированного проектирования (САПР) САТІА была разработана параметрическая 3D-модель отражающей поверхности, учитывающая возможность перемещения кольцевых шнуров вдоль радиальных лент.

С помощью построенной модели было выполнено разделение отражающей поверхности рассматриваемого рефлектора на выкройки, схема расположения которых представлена на рис. 5. Поскольку раскрой проводится для поверхности второго порядка, то у всех выкроек, получаемых при таком способе разделения, наблюдается в развернутом состоянии бочкообразность. Это явление представляет собой непрямолинейность образующих, расстояние между которыми увеличивается от краев к середине выкройки. На рис. 6 представлен эскиз типовой выкройки с бочкообразностью в развернутом состоянии.



Рис. 5. Схема расположения выкроек: 1–1...10–1 – крепление кольцевого шнура на радиальной ленте большей длины; 1–2...10–2 – крепление кольцевого шнура на радиальной ленте меньшей длины, № 1-№ 11 – выкройки



Рис. 6. Эскиз типовой выкройки в развернутом состоянии: a, b – значения бочкообразности;

А, В, С, D – вершины выкройки; А, Е, F, D – вершины заготовки; В1, В2 – расстояния между точками крепления кольцевых шнуров на соответствующих радиальных лентах;

H1, H2 – размеры, определяющие ширину заготовки с каждой стороны; L1, L2 – размеры, определяющие длину каждой из образующих Значение бочкообразности напрямую зависит от кривизны поверхности, наибольшая величина которой наблюдается у вершины эллиптического параболоида. Отсюда следует, что максимальные значения бочкообразности будут у выкроек сектора № 1, расположенного ближе остальных к вершине параболоида. Результаты раскроя сектора № 1 представлены в табл. 2.

Полученные результаты подтверждают высокую точность раскроя отражающей поверхности с последующим развертыванием выкроек на плоскость в САПР САТІА:

 максимальное расхождение между всеми размерами В1 не превышает 0,1 мм;

 максимальное расхождение между всеми размерами В2 не превышает 0,2 мм;

максимальная разница между размерами
 L2 и размерами L1 смежных выкроек составила
 0,8 мм (сегменты № 10–11).

### Определение возможности изготовления выкроек без учета бочкообразности

При изготовлении выкроек из крупноячеистого сетеполотна важно сохранять в целостности структуру плетения вдоль кольцевых шнуров, возле которых в сетеполотне возникают наибольшие усилия [13–14]. Для этого все разрезы необходимо выполнять вдоль одного петельного ряда. Наличие бочкообразности делает невозможным

№ 3 (45) 2023



Таблица 2

Том 7

Выкройка, №	Н1, мм	Н2, мм	В1, мм	В2, мм	а, мм	b, мм	L1, мм	L2, мм
1	1591,4	1591,4	1661,8	1806,9	0,1	-	1334,2	1334,2
2	1591,2	1592,0	1661,8	1807,0	0,2	0,1	2668,4	1334,3
3	1591,3	1592,7	1661,8	1807,0	0,5	0,4	4001,0	2668,5
4	1591,6	1593,9	1661,9	1807,0	0,9	1,0	5330,5	4001,1
5	1592,2	1595,6	1661,9	1807,0	1,6	2,1	6654,8	5330,5
6	1593,1	1598,0	1661,9	1807,0	2,5	3,5	7972,0	6654,9
7	1594,2	1600,9	1661,9	1807,1	3,8	5,2	9279,6	7972,0
8	1595,8	1604,5	1661,9	1807,1	5,3	7,5	10575,0	9279,6
9	1597,7	1609,0	1661,9	1807,1	7,2	10,1	11855,3	10575,2
10	1600,1	1614,1	1661,9	1807,1	9,8	12,8	13117,9	11855,8
11	1601,5	1617,6	1661,8	1807,0	-	6,0	14365,9	13117,1

Геометрические размеры выкроек в развернутом состоянии для сектора № 1

выполнение этого требования. Однако существует возможность изготовления выкроек без бочкообразности в виде четырехугольников ABCD (рис. 6) при условии обеспечения необходимого натяжения.

В конструкции рефлектора невозможно обеспечить одинаковое усилие натяжения по всей отражающей поверхности, поэтому требование по усилию рабочего натяжения предъявляется в виде диапазона  $\sigma = (2...3)$  г/см. Чтобы гарантировать минимальное усилие натяжения, необходимое для расправления сетеполотна, выкройки изготавливают под натяжением  $\sigma=2$  г/см. Исключение из выкройки участков, определяющих бочкообразность, приведет в составе рефлектора к возрастанию натяжения внутри выкройки.

Определим величину натяжения, возникающую в выкройке с максимальным значением бочкообразности, в случае изготовления этой выкройки без бочкообразности. Для этого на образцах сетеполотна (рис. 1) были проведены испытания по определению зависимости относительного удлинения сетеполотна от усилия натяжения

в соответствии с методикой, описанной в работах Е.С. Бабковой [8, 15]. Результаты испытаний представлены в табл. 3 и на рис. 7.

Максимальные значения бочкообразности можно наблюдать в выкройке № 10 сектора № 1 (табл. 2): а = 9,8 мм, b = 12,8 мм. Ширина заготовки при изготовлении этой выкройки без бочкообразности под нагрузкой 2 г/см составляет (табл. 2):  $l_{3ar,2} = 1614,1$  мм.

Ширина заготовки с учетом бочкообразности будет равняться:

$$l_{\text{заг.сум}} = l_{\text{заг.2}} + a + b = 1636,7$$
 мм.

Согласно табл. 3 относительное удлинение сетеполотна по ширине под нагрузкой 2 г/см составляет:  $\varepsilon_2$ =33,3 %. Тогда ширина заготовки без бочкообразности и без нагрузки составит:

$$l_{3ar.0} = \frac{l_{3ar.2}}{(100\% + \varepsilon_2)} 100\% = 1210,9$$
 мм.

Отсюда определяем относительное удлинение по ширине для заготовки, изготовленной без бочкообразности и растянутой до ширины с учетом бочкообразности  $l_{\text{заг,сум}}$ :

Таблица 3

Нагрузка, г/см	Линейный	размер, мм	Относительное удлинение, %		
	Длина	Ширина	Длина	Ширина	
0	300	300	0	0	
0,5	349	360	16,33	20	
1	362	380	20,67	26,67	
1,5	365	393	21,67	31,0	
2	367	400	22,33	33,33	
3	369	407	23,0	35,67	
4	371	410	23,67	36,67	
5	377	415	25,67	38,33	

Относительное удлинение сетеполотна при изменении нагрузки

206

Разработка способа разделения радиоотражающей поверхности крупногабаритного рефлектора



Согласно рис. 7, при таком относительном удлинении максимальное усилие натяжения в выкройке, изготовленной без бочкообразности, составит  $\approx 2,9$  г/см, что удовлетворяет требованию по усилию рабочего натяжения. Следовательно, выкройки для разработанного варианта раскроя можно изготавливать без учета бочкообразности.

# 5. Оптимизация раскроя

Несмотря на равномерное распределение точек закрепления кольцевых шнуров по радиальной ленте, заготовки для изготовления выкроек без бочкообразности имеют непараллельные образующие AD и EF, что выражается в различии между размерами H1 и H2 (табл. 2). Данное явление вызвано разной кривизной отражающей поверхности в радиальном направлении, что при разворачивании выкройки на плоскость приводит к неравенству углов ЕАВ и CDF.

Из результатов, представленных в табл. 2, видно, что выкройки № 9-№ 10 имеют разницу между размерами Н1 и Н2, превышающую размеры ячеек сетеполотна, находящегося под действием рабочей нагрузки (рис. 1). Данный факт однозначно гарантирует нарушение целостности структуры плетения сетеполотна вдоль кольцевых шнуров при изготовлении этих выкроек.

С целью устранения в заготовках разницы по ширине в параметрической модели отражающей поверхности была проведена оптимизация раскроя по следующему алгоритму:

1) в секторах № 2 и № 3 перемещали последовательно от центра наружу точки закрепления кольцевых шнуров 2–1...10–1 по радиальной ленте до достижения равенства размеров Н1 и Н2 во всех заготовках этих секторов;

2) после выполнения пункта 1 данного алгоритма в секторах № 1 и № 4 перемещали последовательно от центра наружу точки закрепления кольцевых шнуров 2–1...10–1 по радиальной ленте до достижения равенства размеров Н1 и Н2 во всех заготовках секторов № 1 и № 4.

Геометрические размеры выкроек в развернутом состоянии для сектора № 1 после оптимизации представлены в табл. 4

Из результатов, представленных в табл. 4, видно, что проведенная оптимизация позволила достичь равенства размеров Н1 и Н2 во всех выкройках, кроме выкройки № 11, расположенной на периферии (данная выкройка опирается только на один кольцевой шнур, поэтому нет необходимости достигать в ней одинаковой ширины), и тем

Таблица 4

Выкройка, №	Н1, мм	Н2, мм	В1, мм	В2, мм	L1, мм	L2, мм	$\Delta^*$ , mm
1	1591,4	1591,4	1661,8	1806,9	1334,2	1334,2	-
2	1589,8	1589,8	1660,3	1804,6	2666,8	1334,3	2,45 (2–1)
3	1587,9	1587,8	1658,3	1801,3	3995,7	2666,9	8,2 (3–1)
4	1585,7	1585,7	1655,9	1797,2	5318,8	3995,8	18,05 (4–1)
5	1583,4	1583,4	1653,2	1792,2	6633,8	5318,9	32,85 (5–1)
6	1580,9	1580,9	1650,0	1786,4	7938,1	6633,9	53,45 (6–1)
7	1578,4	1578,3	1646,5	1779,8	9229,0	7938,1	80,72 (7–1)
8	1575,9	1575,9	1642,6	1772,5	10503,8	9229,2	115,33 (8–1)
9	1573,6	1573,5	1638,6	1764,4	11759,4	10504,0	157,95 (9–1)
10	1571,4	1571,4	1634,5	1756,0	12993,3	11759,8	209,0 (10–1)
11	1711,5	1809,3	1778,8	2015,9	14367,2	12993,0	-

Геометрические размеры выкроек в развернутом состоянии для сектора № 1 после оптимизации

\*- перемещение точки (указанной в скобках) по радиальной ленте. Положительное значение ∆ говорит о перемещении точки к центру рефлектора.



самым обеспечила целостность структуры плетения сетеполотна вдоль кольцевых шнуров.

### Заключение

В работе приведены результаты разработки способа раскроя отражающей поверхности, учитывающего структурные особенности сетеполотна с крупной ячейкой.

С целью улучшения радиотехнических характеристик антенны были сформулированы критерии для разработки, позволяющие исключить при раскрое существенные искажения отражающей поверхности вдоль соединительных швов. Раскрой был реализован для офсетного крупногабаритного рефлектора путем создания параметрической 3D-модели отражающей поверхности. Результаты раскроя подтверждают высокую точ-

ность получения выкроек отражающей поверхности с последующим их развертыванием на плоскость в САПР САТІА.

На основе результатов испытаний образцов сетеполотна и анализа геометрии полученных выкроек была определена возможность изготовления выкроек без учета бочкообразности. Разработан алгоритм оптимизации раскроя, который позволил повысить технологичность изготовления выкроек за счет сохранения целостности ячеистой структуры сетеполотна вдоль кольцевых шнуров.

Полученные результаты показывают, что разработанный вариант раскроя полностью соответствует поставленным требованиям и может использоваться для формирования отражающей поверхности из сетеполотна с крупноячеистой структурой.

#### Список литературы

- [1] Лопатин А.В., Рутковская М.А. Обзор конструкций современных трансформируемых космических антенн (часть 1) // Вестник СибГАУ. 2007. № 2. С. 51–57.
- [2] Im E. Prospects of Large Deployable Reflector Antennas for a New Generation of Geostationary Doppler Weather Radar Satellites / Eastwood Im, Mark Thomson, Houfei Fangand other. American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA 2007–9917. 2007.
- [3] Пономарев С.В. Трансформируемые рефлекторы антенн космических аппаратов // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2011. № 4(16). С. 110–119.
- [4] Imbriale W.A., Gao S., Boccia L. Space Antenna Handbook. John Wiley & Sons Ltd., 2012. 744 p.
- [5] Бабкова Е. С. Проектирование трикотажных сетчатых материалов технического назначения // Сборник XXVI Международной научно-практической конференции «Вопросы современных научных исследований», 2018. № 6–3(21). С. 432–433.
- [6] Рытикова И.В. Разработка технологии формирования сложноконструктивных изделий из металлических трикотажных полотен технического назначения: дисс. ... канд. тех. наук: 05.19.02. М., 2005. 253 с.
- [7] Юртаев Е.В., Рудько А.А., Танасиенко Ф.В. Математическая модель расчета потока солнечного излучения, пропускаемого сетчатым антенным рефлектором при движении по орбите // Решетневские чтения: материалы XV Междунар. науч.-практ. конф. 2015. Ч. 1. С. 216–217.
- [8] Бабкова Е.С. Разработка технологии изготовления отражающих поверхностей трансформируемых антенн из металлотрикотажных сетеполотен с увеличенным размером ячеек: дисс. ... канд. тех. наук: 05.19.02. М., 2020. 160 с.
- [9] Заваруев В. А. Разработка технологии производства металлотрикотажных сетеполотен для изделий космической и наземной систем связи: дисс. ... д-ра тех. наук: 05.19.02. М., 2006. 466 с.
- [10] Заваруев В.А., Котович О.С. Исследование влияния типов петель основовязаного трикотажа из металлических нитей на его физико-механические и электрофизические свойства // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2007. № 3. С. 91–93.
- [11] Саяпин С. Н. Анализ современного состояния и перспективы развития методов контроля натяжения радиоотражающего сетеполотна на развертываемый каркас крупногабаритной зеркальной антенны // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2021, № 2. С. 41–55.
- [12] Сухарев Е.Н., Коловский Ю.В. Метод определения натяжения сетеполотна антенн на основе распознавания образов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева, 2006, № 1. С. 96–100.
- [13] Евдокимов А.С., Пономарев С.В., Буянов Ю.И. Совместный расчет напряженно-деформируемого состояния и диаграммы направленности космических рефлекторов // Вестник Томского государственного университета, 2011, № 1(13). С. 74–82.
- [14] Пономарев В.С. Напряженно-деформированное состояние антенных рефлекторов космических аппаратов при нестационарных тепловых воздействиях: дисс. ... канд. физ.-мат. наук: 01.02.04. Т., 2015. 139 с.
- [15] Бабкова Е. С., Колесникова Е. Н. Исследование и оценка свойств металлического трикотажного сетеполотна // Сборник материалов XXII Международного научно-практического форума SMARTEX-2019 «Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы Ч.-2». 2019. С. 105–109.

Разработка способа разделения радиоотражающей поверхности крупногабаритного рефлектора

# DEVELOPMENT METHOD OF SPLITTING THE RADIO-REFLECTIVE LARGE-SIZED REFLECTOR SURFACE INTO CUTTING PATTERNS MADE OF MESH WITH COARSE CELLS

# A.V. Ivanov, K.A. Kushnir, M.S. Simonova

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

An important design component of space antenna reflectors is a reflecting surface. At present, metallic knitted mesh fabric is most often used as a reflective surface; it fully meets the requirements for such surfaces in terms of physical and mechanical properties. Particularly important characteristics for large-sized reflectors are low specific gravity and high light transmission coefficient, which a mesh with coarse cells provides. However, the structural features of this mesh fabric impose additional requirements on its use as a reflective surface for large-sized transformable reflectors. The article deals with a special approach to designing patterns for a reflective surface made of mesh with coarse cells. The developed pattern cutting option allows to obtain a reflective surface with the least distortion (error), in accordance formulated criteria. The authors have suggested the option of obtaining cutting patterns of metallic mesh fabric, described the advantages of the proposed option over the classical one. The cutting pattern of the parabolic surface for the offset reflector was obtained. The proposed cutting pattern option was analyzed. Furthermore, optimization was carried out, which made it possible to maintain the integrity of the cellular structure of patterns along one loop row. The compared results show that the developed cutting pattern option completely complies with the requirements and it can be used to form a reflective surface from the metallic knitted mesh with coarse cells.

Keywords: large-sized reflector, metallic knitting mesh fabric, radio-reflecting surface, cutting pattern, coarse-mesh structure, barrel shape.

# References

- Lopatin A.V., Rutkovskaya M.A. Obzor konstruktsiy sovremennykh transformiruemykh kosmicheskikh antenn (chast' 1) [The review of designs of modern transformed space antennas (part 1)] // Siberian Aerospace Journal, 2007, № 2, pp. 51–57. (In Russian)
- [2] Im E. Prospects of Large Deployable Reflector Antennas for a New Generation of Geostationary Doppler Weather Radar Satellites / Eastwood Im, Mark Thomson, Houfei Fangand other. – American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA 2007–9917. 2007.
- [3] Ponomarev S.V. Transformiruemye reflektory antenn kosmicheskikh apparatov [Transformable reflectors of spacecraft antennas] // Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics, 2011, № 4(16), pp. 110–119. (In Russian)
- [4] Imbriale W.A., Gao S., Boccia L. Space Antenna Handbook. John Wiley & Sons Ltd., 2012. 744 p.
- [5] Babkova E. S. Proektirovanie trikotazhnyh setchatyh materialov tekhnicheskogo naznacheniya [Design of knitted mesh materials for technical purposes]. Sbornik XXVI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Voprosy sovremennyh nauchnyh issledovanij», 2018, vol. 6–3(21), pp. 432–433. (In Russian)
- [6] Rytikova I.V. Razrabotka tekhnologii formirovaniya slozhnokonstruktivnyh izdelij iz metallicheskih trikotazhnyh poloten tekhnicheskogo naznacheniya [Development of technology for the formation of complex structural products from metal knitted fabrics for technical purposes]. Ph.D. thesis. Moscow, 2005, 253 p. (In Russian)
- [7] Yurtaev E.V., Rudko A.A., Tanasienko F.V. Matematicheskaya model' rascheta potoka solnechnogo izlucheniya, propuskaemogo setchatym antennym reflektorom pri dvizhenii po orbite [The mathematical model to calculate solar flux transmitted via mesh antenna reflector during orbital motion]. Materialy XV Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya" [Materials XV Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2015, pp. 216–217. (In Russian)
- [8] Babkova E.S. Razrabotka tekhnologii izgotovleniya otrazhayushchih poverhnostej transformiruemyh antenn iz metallotrikotazhnyh setepoloten s uvelichennym razmerom yacheek [Development of technology for the manufacture

of reflective surfaces of transformable antennas from metal-knitted mesh fabrics with an increased cell size]. Ph.D. thesis. Moscow, 2020, 160 p. (In Russian)

- [9] Zavaruev V.A. *Razrabotka tekhnologii proizvodstva metallotrikotazhnyh setepoloten dlya izdelij kosmicheskoj i nazemnoj sistem svyazi* [Development of technology for the production of knitted mesh fabrics for products of space and terrestrial communication systems]. Doctor's degree dissertation. Moscow, 2006, 466 p. (In Russian)
- [10] Zavaruev V. A., Kotovich O. S. *Issledovanie vliyaniya tipov petel' osnovovyazanogo trikotazha iz metallicheskih nitej na ego fiziko-mekhanicheskie i elektrofizicheskie svojstva* [Investigation of the influence of the types of loops of warp-knitted knitwear made of metal threads on its physical, mechanical and electrophysical properties]. Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noj promyshlennosti, 2007, № 3, pp. 91–93. (In Russian)
- [11] Sayapin S.N. Analiz sovremennogo sostoyaniya i perspektivy razvitiya metodov kontrolya natyazheniya radiootrazhayushchego setepolotna na razvertyvaemyj karkas krupnogabaritnoj zerkal'noj antenny [Analysis of Current State and Prospects for Development of Methods for Monitoring Tension of Radio-Reflecting Mesh on Deployable Frame of Large Mirror Antenna]. BMSTU Journal of Mechanical Engineering, 2021, № 2, pp. 41–55. (In Russian)
- [12] Sukharev E. N., Kolovskiy Yu. V. *Metod opredeleniya natyazheniya setepolotna antenn na osnove raspoznavaniya obrazov* [The mesh tension control technique. Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M. F. Reshetneva, 2006, № 1, pp. 96–100 (In Russian).
- [13] Evdokimov A. S., Ponomarev S. V., Buyanov Yu.I. Sovmestnyj raschet napryazhenno-deformiruemogo sostoyaniya *i diagrammy napravlennosti kosmicheskih reflektorov* [Joint calculation of the stressstrain state and antenna patterns of spacecraft reflectors]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, 2011, № 1(13), pp. 74–82. (in Russian)
- [14] Ponomarev V.S. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie antennyh reflektorov kosmicheskih apparatov pri nestacionarnyh teplovyh vozdejstviyah [Stress-strain state of antenna reflectors of space vehicles under non-stationary thermal effects]. Doctor's degree dissertation. Tomsk, 2015, 139 p. (In Russian)
- [15] Babkova E. S., Kolesnikova E. N. Issledovanie i ocenka svojstv metallicheskogo trikotazhnogo setepolotna [Research and evaluation of the properties of a metal knitted mesh fabric] Materials of the XXII International scientific-practical conference SMARTEX-2019, Ivanovo, 2019, Part 2, pp. 105–109. (In Russian)

# Сведения об авторах

Иванов Артём Васильевич – ведущий инженер конструктор АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва». Окончил Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва в 2019 году. Область научных интересов: механические устройства трансформируемых конструкций космических аппаратов.

ORCID: 0000-0002-3252-3987

Кушнир Ксения Андреевна – инженер-конструктор 2 категории АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва». Окончила Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва в 2021 году. Область научных интересов: механические устройства трансформируемых конструкций космических аппаратов.

Симонова Мария Сергеевна – инженер по наладке и испытаниям 2 категории АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва». Окончила институт цветных металлов и материаловедения в 2017 году. Область научных интересов: проектирование трикотажных материалов технического назначения.

210

УДК 621.372.822 DOI 10.26732/j.st.2023.3.05

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОПЕРЕЧНО-ГОФРИРОВАННОЙ ОБОЛОЧКИ ВОЛНОВОДА

## В.В. Тимофеев, И.В. Трифанов, Е.В. Патраев

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

Гибкие поперечно-гофрированные оболочки используются для создания гибких волноводов, которые соединяют жесткие волноводы. Они компенсириют монтажные напряжения при сборке, обеспечивают компенсации температуры и демпфирования вибраций. Эти волноводы широко применяются в системах связи космических аппаратов, от них требуется гибкость, механическая прочность, геометрическая точность и минимальные потери энергии при включении в передающую линию. В данной работе исследуется процесс гофрирования труб прямоугольного профиля из бронзы БрБ2 для создания поперечно-гофрированных оболочек. Цели работы: 1) анализ технологических процессов гофрирования волноводных труб для подбора наиболее точного метода; 2) проведение численного эксперимента для определения технологических параметров. Исходя из анализа методов поперечного гофрирования выбран наиболее рациональный метод гофрирования жидким пуансоном по твердой матрице. Научная новизна заключается в создании математической модели на основании теории изгибающих моментов и растяжения балки. С ее помощью был проведен математический эксперимент, имеющий прикладную пользу для расчетов технологических операций по гофрированию волновода. Найдены необходимые для гофрирования давления для разной геометрии гофра и выявлены закономерности. Математическая модель имеет прикладную пользу для предварительных расчетов технологических операций гофрирования прямоугольных труб. Расчет позволяет подобрать наиболее оптимальный режим технологического процесса: давление жидкости, деформации, изменение пределов текучести, позволяющих качественно изготовить гибкий волновод. Результат вычислений полезен в предварительном проектировании для определения размеров гофрирующей оснастки и усилия, необходимого для осуществления технологического процесса формовки гофров прямоугольных труб.

Ключевые слова: волновод, давление, пластическая деформация, предел текучести, математическое моделирование, штамповка жидкостью, поперечно-гофрированные оболочки.

## Введение

Гибкие поперечно-гофрированные оболочки применяются для производства гибких волноводов. Они необходимы для компенсации монтажных напряжений при сборке, а также для компенсации температуры и демпфирования вибраций [1]. Гибкими волноводами соединяют жесткие волноводы [2]. Волноводы широко применяются в системах связи космических аппаратов [3]. Основные требования к гибким волноводам – гибкость, механическая прочность, геометрическая точность [1] и обеспечение минимальных потерь энергии при включении в передающую линию [2].

Объектом исследования является заготовка, труба прямоугольного профиля из бронзы БрБ2, которую превращают в поперечно-гофрированную оболочку (рис. 1a,  $\delta$ ). Размеры сечений (рис.  $1\delta$ ) и толщины стенок (рис. 1a), указанные в табл. 1, были взяты согласно стандартам [4, 5].

Цели работы: 1) анализ технологических процессов гофрирования волноводных труб для подбора наиболее точного метода; 2) проведение численного эксперимента для определения технологических параметров.

Научная новизна заключается в создании методики расчета технологического процесса, осно-

<sup>⊠</sup> VT-ak@yandex.ru

<sup>©</sup> Ассоциация «ТП «НИСС», 2023



Рис. 1. Гофрированная волноводная труба: а – участок гофрированной бесшовной трубы; б – основные размеры сечения; в – форма гофра [2]

ванного на упрощенной математической модели. Математическая модель имеет прикладную пользу для предварительных расчетов технологических операций гофрирования прямоугольных труб.

212

Преимущества математической модели: не требуется специализированного программного обеспечения; расходуются небольшие вычислительные мощности ЭВМ; может быть точнее метода конечных элементов (МКЭ) [6]; за счет отсутствия дискретизации объекта [6], которая приводит к большому количеству конечных элементов, а значит, и неизвестных задачи, особенно для тел с удаленными границами [6]. Кроме того, МКЭ иногда приводит к разрывам значений исследуемых величин, поскольку процедура метода налагает условия неразрывности обычно лишь в узлах [6].

В связи с международными ограничениями на использование интеллектуальной собственности необходимо разрабатывать собственное программное обеспечение (ПО) или использовать больше свободно распространяемого ПО с открытым исходным кодом.

# 1. Изготовление гофрированных волноводных труб

Лучшие механические и электрические характеристики у гофра с закругленными верхними и нижними частями (рис 1*в*). Для бериллиевой бронзы радиусы закругления подбирают в шесть раз больше толщины стенки. Высота гофра составляет (0,07–0,08)  $\lambda_{\rm B}$ , где  $\lambda_{\rm B}$  – длина волны в волноводе [2].

Длина заготовки гофрированной части для гофров, форма которых дана на рис. 1*в*, рассчитывается по формуле [2]:

$$l_{g} = \left[0,035p \cdot \left(90 - \arccos\frac{h-p}{k} + \arcsin\frac{p}{k}\right) + (1) + 2\sqrt{k^{2} + p^{2}}\right]n, [MM],$$

где h – высота гофров, мм; n – количество гофров;  $0,035 = \pi/90$  град-1;

$$p = r_1 + r_2; \ k = \sqrt{(t/2)^2 \left[h - (r_1 + r_2)^2\right]}.$$

Здесь  $r_1 + r_2$  – внутренние радиусы закруглений гофров, мм; t – шар гофров, мм.

# 2. Методы гофрирования

Для гофрирования волноводных труб используются два основных метода: 1) формовка стенок заготовки жестким пуансоном; 2) формовка эластичным пуансоном по жесткой матрице [2]. Первый метод включает в себя следующие способы: а) профилирование заготовки на зубчатой оправке, 6–7-й класс точности; б) профилирование заготовки разжимным пуансоном, 5-й класс точности; в) зафиксированное обжатие гофра (самый трудоемкий), 4-й класс точности [2].

Перечисленные способы первого метода уменьшают частоту внутренней поверхности волновода на 1–2 класса. Это связано с наличием резких концентраций напряжений.

Этот недостаток отсутствует у метода формовки эластичным пуансоном по жесткой матрице, как, например, метод последовательной вытяжкой с помощью резинового пуансона. Имеет точность в пределах 4–5 класса точности [2].

При гофрировании оболочек резиновым пуансоном отсутствуют резкие концентрации напряжений. Это связано с благоприятными условиями приложения деформирующих сил к обрабатываемому материалу [7]. Аналогичными свойствами обладают процессы штамповки жидкостной и газовой средой [7]. Например, процесс группового формообразования жидкостным пуансоном по жесткой монолитной матрице [7] (рис. 2). Источник [7] содержит подробную, систематизированную, фундаментальную информацию о гофрировании труб.

Процесс группового формообразования жидкостным пуансоном по жесткой монолитной ма-

#### В.В. Тимофеев, И.В. Трифанов, Е.В. Патраев

Математическое моделирование формообразования поперечно-гофрированной оболочки волновода



Рис. 2. Процесс группового формообразования жидкостным пуансоном по жесткой монолитной матрице

трице проще в реализации, чем формообразование резиновым пуансоном.

## 3. Расчетная модель

Был проведен численный эксперимент группового формообразования гофра волноводных труб из бериллиевой бронзы БрБ2 [5] для ряда сечений [4] жидкостным пуансоном по жесткой монолитной матрице. Цель эксперимента – определение геометрии оснастки, параметров технологического процесса гофрирования. Расчетная модель основана на теории изгибающих моментов и растяжении балки [8].

Особенности упрощенной расчетной модели:

 Гофрирование происходит на одинаковую высоту гофры по всему периметру сечения.

 Скругления углов заготовки не учитывались, предполагая, что они изгибаются и растягиваются приближенно прилегающим стенкам.

 Сила трения не учитывалась, так как сильно зависит от условий смазки [7].

Расчетную модель можно представить как две двумерные задачи сопромата:

 Изгиб стенки как балки под действием давления.

 Растяжение боковых стенок под действием усилий от результирующих сил давления.

Давление жидкости действует равномерно на всю внутреннюю поверхность заготовки. Соответственно, давление, необходимое для гофрирования всех гофров, равно давлению, необходимому для создания одного гофра.

Деформируясь, стенка работает как балка на изгиб. Этому изгибу препятствуют боковые стенки. Они растягиваются, удлиняясь на высоту гофры. Следовательно, давление гофрирования стенки определяется формулой:

$$P_{cym} = P_u + P_p, \tag{2}$$

где  $P_u$  – давление, необходимое для изгиба стенок;  $P_p$  – давление, необходимое для растяжения боковых стенок.

Изменение давления от высоты столба жидкости не учитывается, так как изменение давления от высоты жидкости значительно меньше, чем давление, потребное для гофрирования. Гидростатическое давление при гофрировании для изгиба и растяжения стенок находится по формулам [9]:

$$P_u = \frac{Q_u}{S_e}; \tag{3}$$

$$P_p = \frac{Q_p}{S_c},\tag{4}$$

где Q – результирующее усилие, необходимое для деформации;  $S_{s}$  – площадь воздействия давления.

При изгибе стенки *а* и *b* площади воздействия (рис. 3) определяются формулами:

$$S_{aa} = a \cdot l_3; \tag{5}$$

213

$$S_{ab} = b \cdot l_3. \tag{6}$$



Рис. 3. Схема воздействия усилия на участок волновода

# 4. Расчет изгибающих усилий

Заготовка с обоих концов фиксируется и закрепляется герметично. Следовательно, балка должна представляться жестко закрепленной.

Давление лучше всего имитирует равномерная нагрузка. Наиболее близкой моделью является балка, жестко закрепленная с двух сторон и нагруженная равномерной нагрузкой (рис. 4) [8].



Рис. 4. Схема нагружения

Пластическая деформация – это обратная задача сопромата.

Результирующая нагрузка определяется по формуле [8]:

$$Q_u = \frac{ql_3}{2},\tag{7}$$

где  $l_3$  – длина балки, равная длине заготовки; q – равномерная распределенная нагрузка.



Равномерная распределенная нагрузка выводится из наибольшего значения изгибающего момента и находится по формуле [8]:

$$q = \frac{24M}{l_a^2},\tag{8}$$

где М – изгибающий момент.

При пластических деформациях превышается предел текучести материала и нарушается условие прочности [8]:

214

$$\sigma_{\max} = \frac{|M_{\max}|}{W} \le [\sigma]. \tag{9}$$

Соответственно, изгибающий момент (M) можно вычислить из произведения предела текучести материала ( $\sigma_{0,2}$ ) на момент сопротивления сечения (W).

$$M = \sigma_{0,2} \cdot W, \tag{10}$$

где  $\sigma_{0,2}$  – предел текучести материала; W – момент сопротивления сечения.

# 5. Изменение пределов текучести

В зависимости от деформации ( $\varepsilon$ ) предел текучести бронзы марки БрБ2 меняется по формуле [10]:

$$\sigma_{0,2} = 400 + 31 \cdot \varepsilon^{0,75} \text{ MII}a.$$
 (11)

Степень деформации при изгибе балки определяется по формуле [10]:

$$\varepsilon_{\%} = \frac{l_{z} - l_{z}}{l_{z}} \cdot 100 \%,$$
 (12)

где  $l_3$  – длина деформируемого участка заготовки до начала гофрирования, определяемая по формуле (5);  $l_2$  – требуемая длина контура гофра.

Длину контура гофра можно найти графическим методом, замерив на чертеже или приближенным методом по правилу прямоугольного треугольника, считая, что гофр состоит из двух гипотенуз, а катетами являются высота (h) и шаг (t) гофра:

$$l_{e} = 2 \cdot \sqrt{t^2 + h^2} . \tag{13}$$

## 6. Момент сопротивления сечения при изгибе стенки

При решении первой части задачи по гибке стенки сечение имеет вид прямоугольника [8] (рис. 5). Прямоугольник имеет размеры:  $\delta$  – толщина стенки заготовки; a (b) – высота (ширина) стенки волновода.



Рис. 5. Прямоугольное сечение изгибаемой стенки (момент сопротивления сечений  $W_{va}, W_{vb}$ )

Изгиб происходит по наименьшему моменту сопротивления  $W_y$ . Моменты сопротивлений сечений при деформации стенок *a* и *b* [8]:

$$W_{ya} = \frac{a\delta^2}{6}.$$
 (14)

$$W_{yb} = \frac{b\delta^2}{6}.$$
 (15)

## 7. Расчет растягивающих усилий

При гофрировании свободному изгибу стенок как балке препятствует сопротивление боковых стенок (рис. 6*a*).

С учетом того что стенка на высоту гофра растягивается неравномерно, может показаться, что для определения максимального потребного растягивающего давления надо выделить небольшой участок заготовки, предполагая, что он растянется на высоту гофра. Но это не требуется, так как при уменьшении величины длины заготовки ( $l_3$ ) в площади воздействующего давления ( $S_{eb}$ ,  $S_{ea}$ ) (формулы 5, 6) на такую же величину уменьшается длина заготовки ( $l_3$ ) в площади растягиваемого сечения ( $S_{cb}$ ,  $S_{ca}$ ) (формулы 17, 18). Следовательно, вместо метода последовательных приближений и интерполяции можно использовать упрощенную формулу (4) для определения максимального растягивающего давления [8]:

Площади воздействия давлений при растягивании стенок b, a равны площадям воздействия при изгибах стенок a и b и определяются по формулам (5, 6).

Растягивающие усилия рассчитываются по формуле [8] (рис. 6*a*):

$$Q_p = \sigma_{0,2} \cdot S_c, \tag{16}$$

где  $\sigma_{0,2}$  – предел текучести определяется по формуле (9);  $S_c$  – площадь сечения растягивающего участка стенки (рис. 6 $\delta$ );

Так как растягиваемых стенок две, то площади растягиваемых участков волновода при растяжении стенок *b* и *a* определяются по формулам:

$$S_{cb} = 2 \cdot a \cdot \delta;$$
 (17)

#### В.В. Тимофеев, И.В. Трифанов, Е.В. Патраев

Математическое моделирование формообразования поперечно-гофрированной оболочки волновода

$$S_{ca} = 2 \cdot b \cdot \delta. \tag{18}$$

2 – так как растягиваемых стенок 2.



Рис. 6. а – схема воздействия растягивающего усилия на 2 стенки; б – площадь растягиваемой стенки

Деформации при растяжении боковых *b* стенок:

$$\varepsilon_{\%b} = \frac{2 \cdot h}{a} \cdot 100 \% \tag{19}$$

Соответственно, деформации при растяжении боковых *а* стенок:

$$\varepsilon_{\%a} = \frac{2 \cdot h}{b} \cdot 100 \%, \tag{20}$$

где *a* (*b*) – длина препятствующей боковой стенки; *h* – высота гофра; 2 – так как стенка растягивается на величину 2-х гофров.

# 8. Программа расчета на ЭВМ

Программа расчета основана на линейном Результаты алгоритме без использования логических опера- в виде таблиц.





торов (рис. 7). При расчете различных вариантов сечений наиболее удобным является использование матриц. По этим причинам алгоритм математической модели был реализован в программе Libreoffice Calc (аналог Microsoft Excel).

## 9. Результаты расчетов

Результаты расчетов программ представлены в виде таблиц.

Таблица 1

215

Основные геометрические параметры гофра:  $\delta$ , мм – толщина стенки; a, мм – длинная стенка; b, мм – короткая стенка;  $h_2$ , мм – высота гофра;  $r_1(r_2)$ , мм – радиус гофра; t, мм – шаг гофра;  $l_3$ , мм – длина заготовки;  $l_2$ , мм – длина контура гофра

δ, мм	a	b	<i>h</i> <sub>г</sub> , мм	<i>r</i> <sub>1</sub> , мм	<i>r</i> <sub>2</sub> , мм	<i>р</i> , мм	<i>t</i> , мм	k	<i>l</i> з, мм	<i>lг</i> , мм
0,05	19	9,5	0,76	0,300	0,300	0,600	2	0,632	2,211	2,512
0,05	28,5	12,6	1,008	0,300	0,300	0,600	2	0,805	2,725	2,840
0,05	28,5	12,6	1,008	0,300	0,300	0,600	7	2,817	5,939	7,285
0,08	28,5	12,6	1,008	0,480	0,480	0,960	7	1,029	3,146	7,285
0,08	48	24	1,92	0,480	0,480	0,960	7	3,497	7,796	7,984
0,11	48	24	1,92	0,660	0,660	1,320	7	1,475	5,359	7,984

<u>№ 3 (45) 2023</u> Том 7



216

Таблица 2

Гибка короткой стенки (b): ε, % – деформации; σ<sub>02</sub>, H/мм<sup>2</sup> (МПа) – предел текучести от деформации (БрБ2); *Wy*, мм<sup>3</sup> – момент сопротивления сечения; *M*, H·мм – изгибающий момент; *q*, H/мм – распределенная нагрузка; *Q*, H – результирующая нагрузка; *S*<sub>e</sub>, мм<sup>2</sup> – площадь воздействия давления; *P*, МПа и *P*, атм – давление в МПа и в атмосферах

ε, %	σ <sub>02</sub> , МПа	₩у, мм <sup>3</sup>	M, Н·мм	<i>q</i> , Н/мм	<i>Q</i> , H	$S_{e},  { m MM}^{2}$	<i>P</i> , МПа	Р, атм
12,000	599,872	0,004	2,374	11,662	12,890	21,001	0,614	6,057
4,048	488,461	0,005	2,564	8,289	11,294	34,333	0,329	3,246
18,475	676,250	0,005	3,550	2,416	7,174	74,828	0,096	0,946
56,818	1041,542	0,013	13,998	33,953	53,401	39,635	1,347	13,297
2,351	458,857	0,026	11,747	4,638	18,080	187,113	0,097	0,954
32,880	825,659	0,048	39,962	33,397	89,485	128,614	0,696	6,867

Таблица 3

Гибка длинной стенки (*a*): ε, % – деформации; σ<sub>02</sub>, H/мм<sup>2</sup> – предел текучести от деформации (БрБ2); *Wy*, мм<sup>3</sup> – момент сопротивления сечения; *M*, H·мм – изгибающий момент; *q*, H/мм – распределенная нагрузка; *Q*, H – результирующая нагрузка; *S<sub>e</sub>*, мм<sup>2</sup> – площадь воздействия давления; *P*, МПа и *P*, атм – давление в МПа и в атмосферах

ε, %	σ <sub>02</sub> , ΜΠa	₩у, мм <sup>3</sup>	М, Н∙мм	<i>q</i> , Н/мм	<i>Q</i> , H	<i>S</i> <sub>6</sub> , мм <sup>2</sup>	<i>P</i> , МПа	Р, атм
12,000	599,872	0,008	4,749	23,323	25,779	42,001	0,614	6,057
4,048	488,461	0,012	5,800	18,750	25,545	77,657	0,329	3,246
18,475	676,250	0,012	8,030	5,465	16,227	169,253	0,096	0,946
56,818	1041,542	0,030	31,663	76,798	120,789	89,650	1,347	13,297
2,351	458,857	0,051	23,493	9,276	36,161	374,226	0,097	0,954
32,880	825,659	0,097	79,924	66,794	178,970	257,228	0,696	6,867

Таблица 4

Растяжение боковых стенок, препятствующих изгибу короткой стенки (*b*) под действием давления, *S<sub>c</sub>* – площадь сечения стенки; ε, % – деформации; σ<sub>02</sub>, H/мм<sup>2</sup> – предел текучести от деформации (БрБ2); *Q*, H – растягивающее усилие; *P*, МПа и *P*, атм – давление в МПа и в атмосферах

$S_c$ , MM <sup>2</sup>	ε, %	σ <sub>02</sub> , Н/мм <sup>2</sup>	<i>Q</i> , H	<i>P</i> , МПа	Р, атм	Р <sub>сум</sub> , атм
0,221	8,000	547,462	121,022	5,763	56,874	62,931
0,272	7,074	534,461	145,631	4,242	41,863	45,109
0,594	7,074	534,461	317,400	4,242	41,863	42,809
0,503	7,074	534,461	268,993	6,787	66,981	80,278
1,247	8,000	547,462	682,915	3,650	36,020	36,974
1,179	8,000	547,462	645,435	5,018	49,528	56,394

Таблица 5

Растяжение боковых стенок, препятствующих изгибу длинной стенки (*a*) под действием давления, S<sub>c</sub> – площадь сечения стенки; ε, % – деформации; σ<sub>02</sub>, H/мм<sup>2</sup> (МПа) – предел текучести от деформации (БрБ2); Q, H – растягивающее усилие; P, МПа и P, атм – давление в МПа и в атмосферах

$S_c$ , MM <sup>2</sup>	ε, %	σ <sub>02</sub> , Н/мм <sup>2</sup>	<i>Q</i> , H	<i>P</i> , МПа	Р, атм	<i>Р<sub>сум</sub></i> , атм
0,221	16,000	648,000	143,247	3,411	33,659	39,717
0,272	16,000	648,000	176,569	2,274	22,440	25,686
0,594	16,000	648,000	384,828	2,274	22,440	23,386
0,503	16,000	648,000	326,137	3,638	35,903	49,200
1,247	16,000	648,000	808,329	2,160	21,318	22,271
1,179	16,000	648,000	763,966	2,970	29,312	36,178

#### Заключение

Проведен анализ способов формования поперечно-гофрированных оболочек прямоугольного профиля. Обоснован наиболее рациональный метод гофрирования жидкостным пуансоном по жесткой монолитной матрице. Разработаны алгоритм, программа, методика расчета технологических параметров процесса гофрирования жидкостным пуансоном по жесткой монолитной матрице и проведен анализ результатов расчета. Вычислены усилия гибки на основе расчетов момента, изменения предела текучести, деформаций.

По табл. 2 и 3 видно, что для изгиба длинной и короткой стенок требуется одинаковое давление. Это связано с тем, что площадь воздействия ( $S_e$ ) и момент сопротивления сечения (Wy) по формулам (5, 6, 14, 15) имеют прямую зависимость от длинной и короткой стенок.

Из табл. 4 и 5 видно, что наибольшее давление требуется при гофрировании короткой стенки, это связано с меньшей площадью воздействия давления, потребное давление формообразования гофра отражено в табл. 4.

Давление для образования гофра зависит от размера наименьшей стенки сечения, толщины стенки, шага гофра. Чем меньше стенка, тем требуется большее давление для деформации, так как уменьшается площадь воздействия. При увеличении толщины стенки возрастает момент сопротивления сечения (табл. 2 и 3) и площадь боковых растягиваемых стенок, соответственно, возрастает давление формования (табл. 4 и 5). По таблицам можно заметить, что при увеличении шага гофра давление для изгиба возрастает (табл. 3, 4), а давление для растяжения остается неизменным (табл. 4, 5).

Данный расчет может использоваться в предварительном проектировании для определения размеров гофрирующей оснастки и усилия, необходимого для осуществления технологического процесса формовки гофров прямоугольных труб, что позволяет подобрать наиболее оптимальный режим технологического процесса: давление жидкости, деформации, изменение пределов текучести, позволяющих качественно изготовить гибкий волновод.

С помощью сканера механических напряжений STRESSVISION возможно обнаружить остаточные механические напряжения, которые возникают после гофрирования [11].

После производства гофрированного волновода необходимо провести электрические испытания, включая измерение КСВ (коэффициент стоячей волны) и выявление потерь в канале [12].

## Список литературы

- Изготовление гибких волноводов для космических аппаратов [Электронный pecypc]. URL: https://tmnpo.ru/ node/654 (дата обращения: 22.05.2023).
- [2] Изготовление гофрированных волноводных труб [Электронный ресурс]. URL: https://studfile.net/ preview/1676197/page:9/ (дата обращения: 22.05.2023).
- [3] William A. Imbriale, Steven Gao, Luigi Boccia.Space Antenna Handbook // John Wiley & Sons Ltd. United Kingdom, 2012. P. 768.
- [4] ГОСТ 20900–2014. Межгосударственный. СТАНДАРТ. Трубы волноводные медные и латунные прямоугольные. Технические условия. Взамен ГОСТ 20900–75; Введ. 2015–09–01. М.: Стандартинформ, 2015. 17 с.
- [5] ГОСТ 1789–2013. Межгосударственный. СТАНДАРТ. Полосы и ленты из бериллиевой бронзы. Технические условия. Взамен ГОСТ 1789–70; Введ. 2015–01–01. М.: Стандартинформ, 2014. 17 с.
- [6] Многоуровневые дискретные и дискретно-континуальные методы локального расчета строительных конструкций: монография / Акимов П. А., Мозгалева М. Л. М.: МГСУ. 2014. 632 с. ISBN 978–5–7264–0907–8
- [7] Исаченков Е.И. Штамповка резиной и жидкостью. М.: Машиностроение, 1967. 367 с.
- [8] "Справочник по сопротивлению материалов." читать интересную книгу автора (Писаренко Г.С. и др.) [Электронный ресурс]. URL: https://reallib.org/reader?file=678387&pg=142 (дата обращения: 22.05.2023).
- [9] Гроховский Д.В. Основы гидравлики и гидропривод: учеб. пособие. СПб.: Политехника, 2013. 236 с.: ил. ISBN 978-5-7325-0962-5
- [10] Логинов Ю.Н. Медь и деформируемые медные сплавы: учеб. пособие. 2-е изд., стер. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. 136 с.
- [11] Сканер механических напряжений STRESSVISION® [Электронный ресурс]. URL: https://stressvision.ru/ (дата обращения: 22.02.2023).
- [12] Трифанов И.В., Оборина Л.И., Бакин А. М. Теоретические основы построения и методы испытаний антеннофидерных устройств средств связи, приборов контроля и обнаружения: учеб. пособие. Сиб. гос. аэрокосмический ун-т. Красноярск, 2010. 108 с.

# MATHEMATICAL MODELING OF CROSS-CORRUGATED WAVEGUIDE SHELL FORMATION

# V.V. Timofeev, I.V. Trifanov, E.V. Patraev

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

Flexible cross-corrugated shells are used to create flexible waveguides that connect rigid waveguides. They compensate for mounting stresses during assembly, provide temperature compensation and vibration damping. These waveguides are widely used in spacecraft communication systems, they are required – flexibility, mechanical strength, geometric accuracy and minimal energy loss when connected to the transmission line. In this paper, the process of corrugating rectangular profile pipes made of BrB 2 bronze to create transversely corrugated shells is investigated. Objectives of the work: 1) analysis of technological processes of corrugation of waveguide pipes to select the most accurate method; 2) conducting a numerical experiment to determine technological parameters. Based on the analysis of the methods of transverse corrugation, the most rational method of corrugation with a liquid punch on a solid matrix has been incorporated. The scientific novelty lies in the creation of a mathematical model based on the theory of bending moments and beam stretching. With its help, a mathematical experiment was carried out, which has an applied benefit for the calculations of technological operations, for the corrugation of a waveguide. The pressures necessary for corrugation for different corrugation geometries are found and patterns are revealed. The mathematical model has an applied use for preliminary calculations of technological operations of corrugation of rectangular pipes. The calculation allows you to choose the most optimal mode of the technological process: fluid pressure, deformation, change in yield strength, allowing you to produce a flexible waveguide qualitatively. The result of the calculations is useful in preliminary design to determine the size of the corrugating equipment and the effort required to implement the technological process of forming the corrugations of rectangular pipes.

Keywords: waveguide, pressure, plastic deformation, yield strength, mathematical modeling, liquid stamping, cross-corrugated shells.

# References

- [1] *Izgotovlenie gibkikh volnovodov dlya kosmicheskikh apparatov* [Manufacture of flexible waveguides for spacecraft]. Available at: https://tmnpo.ru/node/654 (accessed 22.05.2023).
- [2] *Izgotovlenie gofrirovannykh volnovodnykh trub* [Manufacture of corrugated waveguide pipes]. Available at: https://studfile.net/preview/1676197/page:9/ (accessed 22.05.2023).
- [3] William A. Imbriale, Steven Gao, Luigi Boccia. Space Antenna Handbook // John Wiley & Sons Ltd. United Kingdom, 2012. P. 768.
- [4] GOST 20900–2014. Mezhgosudarstvennyy. STANDART. Truby volnovodnye mednye i latunnye pryamougol'nye. Tekhnicheskie usloviya. [State Standard 20900–2014. Interstate. standard. Copper and brass rectangular waveguide pipes. Technical conditions]. Vzamen GOST 20900–75; Vved. 2015–09–01. M.: Standartinform Publ., 2015. 17 p.
- [5] GOST 1789–2013. Mezhgosudarstvennyy. STANDART. Polosy i lenty iz berilievoj bronzy. Tehnicheskie uslovija.
   [Interstate. standard. Beryllium bronze strips and ribbons. Technical conditions]. Vzamen GOST 1789–70; Vved. 2015–09–01. M.: Standartinform Publ., 2014. 17 p.
- [6] Akimov P.A., Mozgaleva M.L. Mnogourovnevye diskretnye i diskretno-kontinual'nye metody lokal'nogo rascheta stroitel'nykh konstruktsiy: monografiya [Multilevel discrete and discrete-continuous methods of local calculation of building structures: monograph]. M., MGSU., 2014, 632 p. ISBN 978–5–7264–0907–8
- [7] Isachenkov E. I. Shtampovka rezinoj i zhidkost'ju. [Rubber and liquid stamping]. M.: Mashinostroenie, 1967. 367 p.
- [8] "Spravochnik po soprotivleniyu materialov." chitat' interesnuyu knigu avtora (Pisarenko G. S. i dr.) ["Handbook on the resistance of materials." – read an interesting book by the author (Pisarenko G. S. et al.)]. Available at: https://reallib.org/reader?file=678387&pg=142 (accessed 22.05.2023).
- [9] Grohovskij D.V. Osnovy gidravliki i gidroprivod [Fundamentals of hydraulics and hydraulic drive] Textbook. St. Petersburg: Polytechnic, 2013.–236 p.: ill. ISBN 978–5–7325–0962–5

#### В.В. Тимофеев, И.В. Трифанов, Е.В. Патраев

Математическое моделирование формообразования поперечно-гофрированной оболочки волновода

- [10] Loginov Yu. N. Med' i deformiruemye mednye splavy: uchebnoe posobie [Copper and Wrought Copper Alloys: A Study Guide] 2-e izd., ster. Ekaterinburg: GOU VPO UGTU-UPI, 2006. 136 p.
- [11] *Skaner mekhanicheskikh napryazheniy STRESSVISION*® [Mechanical Stress Scanner STRESSVISION®] Available at: https://stressvision.ru/ (accessed 22.02.2023).
- [12] Trifonov I.V., Oborina L.I., Bakin A.M. Teoreticheskie osnovy postroeniya i metody ispytaniy antenno-fidernykh ustroystv sredstv svyazi, priborov kontrolya i obnaruzheniy [Theoretical foundations of construction and test methods of antenna-feeder devices of communication means, monitoring and detection devices] textbook. SibGAU. Krasnoyarsk, 2010. 108 p.

# Сведения об авторах

Тимофеев Владислав Владиславович – аспирант Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва. Окончил Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва с отличием в 2020 году. Область научных интересов: повышение качества изделий машиностроения.

219

*Трифанов Иван Васильевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технического регулирования и метрологии Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва. Окончил с отличием завод-втуз – филиал КПИ в 1975 году. Область научных интересов: повышение качества изделий машиностроения.

ORCID: 0000-0002-2419-4802

Патраев Евгений Валерьевич – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева. Заместитель генерального директора по производству АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва». Окончил Сибирскую аэрокосмическую академию в 2002 году. Область научных интересов: повышение качества изделий машиностроения. УДК 629.787 DOI 10.26732/j.st.2023.3.06

# СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МУЛЬТИРОТОРНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА КАК ПЕРСПЕКТИВНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО СРЕДСТВА ИЗУЧЕНИЯ АТМОСФЕРЫ И ПОВЕРХНОСТИ ПЛАНЕТЫ ВЕНЕРА

## М.Ю. Яценко<sup>∞</sup>, В.А. Воронцов, В.В. Рыжков

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Российская Федерация

Сейчас исследование планеты Венера является очень актуальным и развивающимся направлением науки о космосе. Развитие ракетных и космических технологий расширило границы доступности космических аппаратов к объектам Солнечной системы, позволило осуществлять целые межпланетные экспедиции, в том числе полеты на планеты земной группы, на планеты-гиганты и на окраины Солнечной системы. В настоящее время формируется программа исследований планет на ближайшие десятилетия. При изучении истории экспедиций на Венеру и Марс появляется ясность о необходимости развивать и всячески улучшать способы исследования атмосферы ближайших к Земле планет, в частности Венеры, с помощью доступных технических средств, делать их как можно более эффективными. Исследовать Венеру в работе предлагается техническим средством – мультироторным летательным аппаратом. Данный объект выделен в виде системы, а также задана и описана его роль в составе надсистемы. В работе выделены сценарии функционирования летательного аппарата, описаны задачи его подсистем, а также их взаимодействие друг с другом. Приведены основные внешние факторы, влияющие на работу подсистем мультироторного летательного аппарата. Разработана функциональная схема системы, а также основные показатели, используемые для оценки эффективности выполнения целевой задачи. Данная работа является предварительным этапом перед построением математической модели.

Ключевые слова: Венера, мультироторный летательный аппарат, техническое средство, объект исследования, подсистема, надсистема, плотность атмосферы, эшелон высот, системотехническое исследование, множество альтернатив.

# Введение

Достижения в области ракетно-космической техники расширили досягаемость космических аппаратов до небесных тел в Солнечной системе, что позволило осуществлять многие межпланетные полеты, включая полеты к планетам, подобным Земле, планетам-гигантам и внешним границам Солнечной системы. В настоящее время разрабатываются планы исследования планет на ближайшие десятилетия. Большую роль играют контактные методы исследования атмосферного и поверхностного пространства при помощи различной техники, такой как: десантные аппараты, автономные станции, аэростатные зонды, планетоходы. В работе предлагается внедрение нового технического средства исследования Венеры – мультироторного летательного аппарата (МРЛА) [1].

История миссий на Венеру показывает необходимость разработки и совершенствования всех средств исследования атмосферы и поверхности ближайшей к Земле планеты и изучения ее наиболее эффективно.

На Венеру организовывалось множество исследовательских полетов. Там побывало порядка сорока аппаратов [2]. Большинство из этих аппаратов – отечественные. Результаты проведенных исследований позволяют наглядно оценить значимость влияния целой группы параметров, имеющих разную физическую основу, к которым в первую очередь относятся:

- химический состав атмосферы;

<sup>🖂</sup> misha-yacenko@mail.ru

<sup>©</sup> Ассоциация «ТП «НИСС», 2023

основные параметры атмосферы планеты:
 плотность, температура, давление и т.п.

Авторами сформулированы следующие научные задачи исследования Венеры с помощью мультироторного летательного аппарата:

 изучение состава атмосферы (как горизонтального, так и вертикального профилей);

– изучение содержания газов в атмосфере и пр.;

– сбор венерианского грунта.

В качестве «базового» аппарата в исследовании принят спускаемый аппарат (СА) типа «Вега». Основными техническими средствами исследования Венеры в составе этого СА являются его подсистемы – посадочный аппарат (ПА) и аэростатный зонд (АЗ).

# 1. Постановка цели исследования

Цель настоящей работы состоит в проведении системотехнического исследования мультироторного летательного аппарата как нового (дополнительного) технического средства изучения Венеры (рис. 1). Это исследование является начальным (подготовительным) этапом перед построением математической модели динамики МРЛА с дальнейшим анализом его движения в облачном слое атмосферы Венеры.

МРЛА планируется использовать в качестве средства для:

– фото-, видеосъемки;

 сбора проб атмосферы научной аппаратурой, например газоанализаторами;

 проведения эксперимента по определению сейсмической активности планеты (посредством группы таких МРЛА);

– сбора проб грунта.



Рис. 1. Модель мультироторного летательного аппарата: 1 – балка винтомоторной группы;
2 – винтомоторная группа; 3 – шасси;
4 – адаптер крепления полезной нагрузки;
5 – приборный отсек

Далее следует описать цели исследуемой системы.

## 2. Формулировка целей исследуемой системы. Показатели эффективности

Перед созданием любой системы необходимо «ввести» количественную меру степени достижения цели, стоящей перед этой самой системой – под этим подразумевается понятие показателя эффективности. То есть показатели эффективности – это параметры, в интересах которых создается система [3, 4].

Существует множество показателей эффективности. Как правило, показатели эффективности можно связать с целями (назначениями) исследования. В данной работе были выделены и описаны свои показатели эффективности.

К основным целям (задачам) технического средства исследования планеты Венера (МРЛА) относятся:

1) сбор проб атмосферы;

2) съемка поверхности;

3) сбор проб грунта поверхности.

Главным критерием эффективности для всех трех целей является время работы системы (время функционирования), т.е. время, необходимое на полную выработку функционального ресурса МРЛА. Поскольку данное исследование – это основополагающий этап для моделирования динамики МРЛА, рассматриваться будут первые две задачи, для выполнения которых необходимо выбрать высоту полета аппарата.

Для изучения газов в атмосфере необходимы соответствующие устройства – газоанализаторы. Важными показателями эффективности на данном этапе исследования являются:

скорость обработки поступающего газа;

объем поступающего газа.

При сборе венерианского грунта стоит сказать о таких показателях, как скорость сбора грунта и максимально допустимый объем собранного грунта.

При съемке должна использоваться камера высокого разрешения. Немаловажным является и процесс передачи полученных фото-, видеоизображений. При передаче записанной информации важны скорость и качество радиопередачи. Скорость полета аппарата тоже играет весомую роль. Например, во избежание смазывания изображения аппарат должен лететь с потребной скоростью, либо стоит обеспечить нужные параметры съемки.

Показатели эффективности можно сгруппировать следующим образом:

 функциональный. Данный показатель характеризует конечную цель исследования планеты,



222

такую как фото-, видеосъемка или же изучение состава атмосферы;

 затратный. На данном этапе стоит определиться с параметрами ЛА: массой, объемом и т.п.
 Определить затрачиваемую энергетику и конечную цену проекта;

– технологический. Он характеризует, как будет конструктивно выполнен аппарат. На данном этапе стоит определиться, какие материалы необходимо использовать и где их закупать.

## 3. Факторы внешней среды как неидеальные условия функционирования аппарата

Атмосферу Венеры считают крайне сложной для функционирования какой-либо аппаратуры. Внешние факторы оказывают значительное влияние на функционирование любой системы, оказавшейся на Венере, и МРЛА не исключение. К основным внешним факторам относятся:

- влияние ветра;

– влияние температуры;

 влияние химического (сернокислотного) состава атмосферы.

Параметры атмосферы сильно разнятся в зависимости от выбранной высоты [5]. В целях упорядочения условий атмосферы планеты на разных высотах стоит ввести понятие эшелона высот  $\Im_N (\Delta H)$ . Разделим атмосферу Венеры на три эшелона высот:

1) 0 ÷ 4 км. Эшелон приповерхностного слоя. Экстремальные условия для функционирования МРЛА с точки зрения внешних факторов: температуры, плотности (или давления) атмосферы;

2) 28 ÷ 32 км. Эшелон высот, оптимальный для съемки;

3) 46 ÷ 60 км. Эшелон с условиями, близкими к земным. На данном эшелоне высот условия по температуре и давлению максимально приближены к земным. Этот эшелон высот считается наиболее благоприятным для функционирования МРЛА.

С увеличением высоты параметры атмосферы значительно изменяются. Поэтому, если заранее определиться с конечной целью, например съемки, можно выбрать подходящую высоту.

### Формирование множества альтернатив рассматриваемой системы

В текущем десятилетии Россия планирует отправить на Венеру космический аппарат (КА), работы по этому проекту уже стартовали [6, 7]. Очевидно, что такой венерианский КА представляет собой сложную техническую систему (СТС). Он состоит из спускаемого аппарата (СА), кото-

рый будет осуществлять вход в атмосферу планеты и орбитального аппарата (ОА), который выйдет на орбиту Венеры и будет использоваться на ней в качестве аппарата для приема и передачи цифровой информации [8].

Спускаемый аппарат также является СТС со своими подсистемами. В данном исследовании авторы в качестве прототипа спускаемого аппарата приняли советский аппарат из серии «Вега», имеющий сферическую форму конструкции. Этот СА состоит из двух подсистем:

посадочного аппарата (ПА);

- системы аэростатного зонда (CA3).

Рассматривается вопрос расширения схемы эксперимента путем включения в состав спускаемого аппарата мультироторного летательного аппарата, а именно размещение МРЛА в СА [1].

То есть надсистемой для МРЛА является СА, который, в свою очередь, является подсистемой всего перспективного венерианского КА (рис. 2).

Таким образом, МРЛА является техническим средством исследования атмосферы и поверхности планеты Венера наряду с посадочным аппаратом и аэростатным зондом.

### 5. Функциональная схема мультироторного летательного аппарата

В исследовании принято, что изучаемое техническое средство (МРЛА) принадлежит к классу летательных аппаратов вертикального взлета и посадки (ЛАВВП), он сконструирован по схеме мультикоптера так, что несущие винты установлены по вертолетной схеме и жестко закреплены на балке.

Предполагается, что каждый такой ЛА имеет в наличии полезную нагрузку:

- камеру для фотосъемки и видеосъемки;

- средства для забора газов;

 оборудование для анализа полученных проб венерианской атмосферы;

 приборы для отслеживания смещений или колебаний венерианской поверхности в результате подземных толчков и остальную технику для исследований, необходимых для конкретно поставленных целей.

На рис. 3 представлена функциональная схема МРЛА, а также внешние факторы, влияющие на подсистемы аппарата [9].

Все элементы функциональной схемы системы взаимосвязаны друг с другом:

 внешние факторы. Оказывают значимое влияние на работу системы отделения, например, замедляя или ускоряя процесс отделения, и на скорость вращения винтомоторной группы (ВМГ) (ускоряя или замедляя вращение винтов в зависимости от действующих возмущений); Системотехническое исследование мультироторного летательного аппарата



Рис. 2. Место МРЛА в составе надсистемы

(здесь і – уровень детализации в морфологической структуре)



Рис. 3. Функциональная схема МРЛА

2) система отделения. По окончании процедуры отделения начинает работу система, обеспечивающая функционирование установленной аппаратуры. Также в процессе отделения возникают колебания в установке ВМГ;

 система накопления энергии. Осуществляет автономное питание электроэнергией системы обеспечения функционирования аппаратуры и прочих подсистем МРЛА;

 система обеспечения функционирования аппаратуры. Запускает всю установленную на ЛА аппаратуру, а также обеспечивает электроэнергией систему управления (СУ) электродвигателями; 5) СУ электродвигателями. Приводит в действие силовую установку ВМГ;

6) силовая установка ВМГ. Как было сказано ранее, это устройство, создающее тягу и обеспечивающее движение МРЛА в заданном направлении.

Под МРЛА подразумевается система одноразового пользования с ограниченным (заданным) временем функционирования. Конструкция спускаемого аппарата типа «Вега» предполагает размещение в своей конструкции несколько таких аппаратов [1, 2]. В табл. представлены предварительные технические характеристики аппарата.





### Таблица

$$\Pi P_{\text{MPЛA}} = [\Pi (\Pi_1, \Pi_2), \phi(t), P, Tx] -$$

Предварительные технические характеристики МРЛА

Конструктивные параметры					
Габариты ЛА (ВхГхШ), мм	не более: 200x350x350				
Коэффициент лобового сопротивления ( <i>C<sub>x</sub></i> )	0,01				
Коэффициент подъемной силы ( $C_y$ )	0,1				
Масса аппарата, кг	1,35				
Площадь поверхности МРЛА, м <sup>2</sup>	0,02				
Радиус винта, м	0,066				
Шаг винта, м	0,143				
Угловая скорость вращения винтов, 1/с	82				
Центральные (главные) моменты инерции, кг·м <sup>2</sup>					
$J_x$	0,01				
$J_y$	0,009				
$J_z$	0,008				
Время функционирования МРЛА (время экспе-					
римента), с					
τ <sub>функц.</sub>	60				

## Заключение

Проведено системотехническое исследование мультироторного летательного аппарата как перспективного технического средства исследования атмосферы и поверхности планеты Венера. Сейчас тема исследования Венеры в России является особенно актуальной. Предлагается располагать МРЛА в конструкции перспективного венерианского КА. В качестве прототипа спускаемого аппарата выбрана конструкция типа «Вега».

В ходе работы описаны цели и задачи, решаемые мультироторным летательным аппаратом на планете Венера, составлена функциональная схема МРЛА, а также выделены основные внешние факторы атмосферы Венеры, влияющие как на функционирование МРЛА в целом, так и на работу отдельных его подсистем. Данное исследование является основополагающим этапом для последующей разработки математической модели динамики движения аппарата с целью определения степени влияния внешних факторов атмосферы Венеры на динамику полета МРЛА на разных эшелонах высот.

Таким образом, в общем виде можем записать, что показатель функциональной эффективности мультироторного летательного аппарата [10]

$$W[\Pi P_{\text{MPJA}}, Y(t_{\text{пр}}), \tau_{\phi y_{\text{HKII}}}] \rightarrow \max$$

выбранное проектное решение МРЛА ( $\Pi P_{MPЛA} \in G$ );  $\Pi$  – технические параметры объекта исследования (МРЛА),

 $\Pi_1 = \{m_{\text{MPЛA}}, \Gamma_{\text{MPЛA}}, N_{\text{рот}}, r_{\text{в}}, J, S_i\}$  – параметры МРЛА,

 $\Pi_2 = \{m_{\Pi \Pi \Pi MPЛA}, \Gamma_{\Pi \Pi MPЛA}, v_{oбр.г.}, v_{заб.гр.}, V_{г.} max, V_{гр.} max, K\} - параметры полезной нагрузки МРЛА,$ 

 $\phi(t)$  – функция управления движением (программа выполнения траекторных операций) МРЛА,

P – надежность системы,

*Тх* – технологичность МРЛА;

$$\mathbf{Y}(t_{\rm np}) = \mathbf{\Im}_{N}(\Delta H) \begin{bmatrix} H_{1}: (\rho_{1}^{N}, T_{1}^{N}, p_{1}^{N}, w_{1}^{N}) \\ \vdots \\ H_{i}: (\rho_{i}^{N}, T_{i}^{N}, p_{i}^{N}, w_{i}^{N}) \\ \vdots \\ H_{M}: (\rho_{M}^{N}, T_{M}^{N}, p_{M}^{N}, w_{M}^{N}) \\ i = \overline{1, M} \end{bmatrix} -$$

условия функционирования МРЛА в атмосфере Венеры;

 $\Im_N (\Delta H)$  – эшелон высот атмосферы Венеры. Каждый эшелон включает диапазон высот ( $\Delta H$ ), каждой из которых соответствует набор уникальных значений – параметров атмосферы Венеры;

 $\tau_{\rm функц}$  – время функционирования МРЛА при выполнении программы исследования;

*t*<sub>пр</sub> – время прогноза реализации проекта;

G – область допустимых решений;

*m*<sub>МРЛА</sub>, *m*<sub>ПН МРЛА</sub> – масса (МРЛА и его полезной нагрузки соответственно);

Г<sub>МРЛА</sub>, Г<sub>ПН МРЛА</sub> – габаритные параметры (МРЛА и его полезной нагрузки соответственно);

*N*<sub>рот</sub> – количество винтов;

*г*<sub>в</sub> – радиус винта;

*J*-инерционные характеристики МРЛА;

 $S_i$  – параметры подсистем МРЛА;

*v*<sub>обр.г.</sub> – скорость обработки подступающего газа в газоанализатор;

*v*<sub>заб.гр</sub> – скорость забора грунта;

 $V_{\rm r.} max$  — максимальный объем собранного газа;  $V_{\rm rp.} max$  — максимальный объем собранного грунта;

К – характеристики камеры для фото-/видеосъемки;

р – значение плотности атмосферы Венеры;

*H* – значение высоты над поверхностью Венеры;

*p* – значение давления в атмосфере Венеры;

Т-значение температуры в атмосфере Венеры;

*w* – значение величины ветровой нагрузки;

*N*-номер рассматриваемого эшелона высот;

*М* – количество значений высот в рассматриваемом эшелоне.

224

где:

### Список литературы

- [1] Яценко М.Ю., Воронцов В.А. К вопросу о включении в программу исследования Венеры дополнительных технических средств // Космические аппараты и технологии. 2022. Т. 6, № 1. С. 5–13. DOI: 10.26732/j. st.2022.1.01
- [2] Автоматические космические аппараты для фундаментальных и прикладных научных исследований / Под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Г.М. Полищука и д-ра техн. наук, проф. К.М. Пичхадзе. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. С. 17–306: ил.
- [3] Бобронников В. Т. Системный анализ в инженерных исследованиях: учеб. пособие. М.: Изд-во МАИ, 2018. 143 с.
- [4] Романов В. Н. Системный анализ для инженеров. СПб.: СЗГЗТУ, 2006. 186 с.
- [5] Строение атмосферы Венеры от поверхности до 100 км / Л.В. Засова, В.И. Мороз, В.М. Линкин и др. // Космические исследования. 2006. Т. 44, № 4. С. 381–400.
- [6] Завершен очередной этап разработки миссии на Венеру. Сайт Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос». URL: https://www.roscosmos.ru/38180/ (дата обращения: 05.03.2023).
- [7] Уникальные проекты коллектива НПО имени С.А. Лавочкина (к 85-й годовщине предприятия) / А.Е. Ширшаков, В.В. Ефанов, А.А. Моишеев, С.В. Шостак // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2022. № 2. С. 8–22. DOI: 10.26162/LS.2022.56.2.001
- [8] Любезный Б.В., Воронцов В.А., Хмель Д.С. Особенности разрабатываемых миссий по исследованию планеты Венера // 57-е Научные чтения, посвященные разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского (Калуга, 20–22 сентября 2022 г.). Сборник тезисов: в 2 ч. Ч. 2: тезисы докл. М.: Изд-во «Эйдос», 2022. С. 88–90.
- [9] Лебедев А.А. Курс системного анализа. М.: Машиностроение, 2010. 256 с.: ил.
- [10] Баллистические ракеты и ракеты-носители: пособие для студентов вузов / О.М. Алифанов, А.Н. Андреев, В.Н. Гущин и др.; Под ред. О.М. Алифанова. М.: Дрофа, 2004. 512 с.: ил.

# SYSTEM ENGINEERING RESEARCH OF A MULTIROTOR AIRCRAFT AS A PROSPECTIVE TECHNICAL MEANS OF EXPLORING THE ATMOSPHERE AND SURFACE OF THE PLANET VENUS

## M. Yu. Yatsenko, V.A. Vorontsov, V.V. Ryzhkov

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

Currently, the exploration of the planet Venus is a very relevant and developing direction in space science. The development of rocket and space technologies has expanded the boundaries of accessibility of spacecraft to objects in the Solar System, allow for entire interplanetary expeditions, including flights to terrestrial planets, giant planets, and the outskirts of the Solar System. Currently, a program of planetary exploration for the next decades is being formed. Studying the history of expeditions to Venus and Mars clarifies the need to develop and improve methods for studying the atmosphere of the nearest planets to Earth, in particular, Venus, using available technical means, making them as efficient as possible. The exploration of Venus is proposed to be carried out using a technical means – a multirotor aircraft. This object is allocated as a system, and its role in the composition of the supersystem is also defined and described. The paper identifies scenarios for the functioning of the flying apparatus are highlighted, the tasks of its subsystems are described, as well as their interaction with each other. The main external factors affecting the work of the subsystems of the multirotor aircraft are presented. A functional scheme of the system is developed, as well as the main indicators used to assess the

225



effectiveness of achieving the target task. This work is a preliminary stage before building a mathematical model.

*Keywords: Venus, multirotor aircraft, technical means of research, object of research, subsystem, supersystem, atmospheric density, altitude level, systems engineering research, many alternatives.* 

# References

- [1] Yatsenko M. Yu. and Vorontsov V.A. *K voprosu o vklyuchenii v programmu issledovaniya Venery dopolnitelnykh tekhnicheskikh sredstv* [To the question of including additional technical means in the Venus exploration program] // Kosmicheskie apparaty i tekhnologii. 2022. Vol. 6, № 1. pp. 5–13. DOI: 10.26732/j.st.2022.1.01
- [2] Avtomaticheskie kosmicheskie apparaty dlya fundamentalnykh i prikladnykh nauchnykh issledovanii [Automatic space vehicles for fundamental and applied scientific research] / Pod obshch. red. d-ra tekhn. nauk, prof. G. M. Polishchuka and d-ra tekhn. nauk, prof. K. M. Pichkhadze. M.: Izd-vo MAI-PRINT, 2010. pp.17–306: il.
- [3] Bobronnikov V.T. *Sistemnyi analiz v inzhenernykh issledovaniyakh* [System analysis in engineering research]: Uchebnoe posobie. M.: Izd-vo MAI, 2018. 143 p.
- [4] Romanov V.N. Sistemnyi analiz dlya inzhenerov [System analysis for engineers]. SPb.: SZGZTU, 2006. 186 p.
- [5] Stroenie atmosfery Venery of poverhnosti do 100 km [Structure of the atmosphere of Venus from the surface to 100 km] / L.V. Zasova, V.I. Moroz, V.M. Linkin, I.V. Khatuntsev, B.S. Mayorov. Kosmicheskie issledovaniya [Space research], 2006, Vol. 44, № 4, pp. 381–400.
- [6] Zavershen ocherednoi etap razrabotki missii na Veneru [Completion of the next stage of mission development to Venus]. Sait Gosudarstvennoi korporatsii po kosmicheskoi deyatelnosti «Roskosmos». URL: https://www.roscosmos. ru/38180/ (Accessed March 05, 2023).
- [7] Unikalnye proekty kollektiva NPO imeni S. A. Lavochkina (k 85-y godovshchine predpriyatiya) [Unique Projects of Lavochkin Association (to the 85-th Anniversary of the Enterprise)] / A. E. Shirshakov, V. V. Efanov, A. A. Moisheev and S. V. Shostak // Vestnik NPO im. S. A. Lavochkina. 2022. № 2. pp.8–22. DOI: 10.26162/LS.2022.56.2.001
- [8] Liubeznyi B. V., Vorontsov V.A. and Khmel D. S. Osobennosti razrabatyvaemykh missii po issledovaniyu planety Venery [Features of the developed missions to study the planet Venus] // 57-e Nauchnye chteniya, posvyashchennye razrabotke nauchnogo naslediya i razvitiyu idei K. E. Tsiolkovskogo (Kaluga, 20–22 sentyabrya 2022 g.). Sbornik tezisov: v 2 ch. Ch.2: tezisy dokl. M.: Izd-vo «Eidos», 2022. pp. 88–90.
- [9] Lebedev A.A. Kurs sistemnogo analiza [Course of the system analysis]. M.: Mashinostroenie, 2010. 256 p.: il.
- [10] Ballisticheskie rakety i rakety-nositeli: Posobie dlya studentov vuzov [Ballistic Missiles and Launch Vehicles: Handbook for University Students] / O. M. Alifanov, A. N. Andreev, V. N. Gushchin and dr.; Pod red. O. M. Alifanova. M.: Drofa, 2004. 512 p.: il.

# Сведения об авторах

Яценко Михаил Юрьевич – аспирант Института № 6 «Аэрокосмический» МАИ. Окончил МАИ с отличием в 2021 году. Область научных интересов: проектирование и конструкция ракетно-космической техники.

Воронцов Виктор Александрович – профессор кафедры «Космические системы и ракетостроение» и кафедры «Системный анализ и управление» Института № 6 «Аэрокосмический» МАИ, доктор техн. наук. Окончил МАИ с отличием в 1975 году. Область научных интересов: проектирование автоматических космических аппаратов для исследования дальнего космоса.

*Рыжков Владислав Валентинович* – аспирант Института № 6 «Аэрокосмический» МАИ. Область научных интересов: системный анализ и специальные организационно-технические системы космического назначения.

226



московский государственный ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. н.э. баумана

Передовые инженерные школы



# ПЕРЕДОВАЯ ИНЖЕНЕРНАЯ ШКОЛА

# "СИСТЕМНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ" МГТУ ИМ. Н.Э. БАУМАНА

# Передовые инженерные школы — Федеральный проект, созданный в 2022 году по инициативе Минобрнауки России. Тематика ПИШ МГТУ им. Н.Э. Баумана «Авиационная и ракетно-космическая техника».

Стратегический партнер ПИШ: Госкорпорация "Роскосмос"

#### ЦЕЛИ ПИШ:

- подготовка специалистов в области системной инженерии для решения прорывных задач ракетно-космической отрасли
  - создания новейшего вида высокотехнологических продуктов на базе комплексного взаимодействия с предприятиями отрасли в образовательной, научно-исследовательской,
  - инновационной деятельностях

### РУКОВОДИТЕЛЬ ПИШ МГТУ ИМ. Н.Э. БАУМАНА – ОЛЕГ ГЕРМАНОВИЧ АРТЕМЬЕВ



#### Герой Российской Федерации

Порядковый номер: 118-й космонавт России и 534-й — мира Количество полетов: 3 Продолжительность полетов: 365 суток 23 часа 05 минут Количество выходов в открытый космос: 8 Продолжительность выходов в открытый космос: 53 час 31 минут

#### Экспедиции

- Союз ТМА-12М, МКС-39/40,
- Союз МС-08, МКС-55/56,
- Союз МС-21, МКС-66/67

# ПРЕИМУЩЕСТВА ОБУЧЕНИЯ ПО ПРОГРАММАМ ПЕРЕДОВОЙ ИНЖЕНЕРНОЙ ШКОЛЫ:

and we the

Участие в проектной деятельности с начала обучения

Индивидуальные образовательные траектории и междисциплинарная подготовка

Трактики и стажировки на предприятиях Госкорпорации "Роскосмос"

Профессиональные наставники из ракетно-космической отрасли

Новые модульные образовательные программы

Участие в реальных исследованиях и разработках от предприятий отрасли





МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н.Э. БАУМАНА Передовые инженерные школы



Передовая инженерная школа Системная инженерия

# НАПРАВЛЕНИЯ ПОДГОТОВКИ ПЕРЕДОВОЙ ИНЖЕНЕРНОЙ ШКОЛЫ

# **СИСТЕМНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ"** МГТУ ИМ. Н.Э. БАУМАНА

#### ПРОГРАММЫ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ В РАМКАХ ПЕРЕДОВОЙ ИНЖЕНЕРНОЙ ШКОЛЫ

- Системное проектирование в ракетно-космической отрасли
- Системная инженерия в проектировании ракетно-космических композитных конструкций
- Системная инженерия жизнеобеспечения космических аппаратов
- Проектное управление разработкой криогенных технологий для жидкостных ракетных двигателей и энергетических установок
- Системная инженерия наземного технологического и стартового оборудования космодрома «Восточный»

- Техническая эксплуатация орбитальных комплексов
- Искусственный интеллект в управлении космическими полётами
- Киберфизические системы аэрокосмической техники
- Системная теплофизика новых производственных технологий

### ПРОГРАММЫ ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ В РАМКАХ ПЕРЕДОВОЙ ИНЖЕНЕРНОЙ ШКОЛЫ

- Численное моделирование физических процессов ракетных и реактивных двигателей
- Рабочие процессы и технологии трехкомпонентных жидкостных ракетных двигательных установок
- Системный подход к обеспечению жизненного цикла изделий ракетно-космической техники
- Космическая баллистика
- Актуальные направления развития технологий ракетно-космического машиностроения на основе системного подхода
- Спутниковые телекоммуникационные системы
- Перспективные технологии создания композитных конструкций с использованием термопластичных связующих
- Система управления инженерными данными и жизненным циклом изделий ракетно-космической техники
- Системная инженерия в ракетно-космической отрасли
- Управление проектами программ развития

ПРИГЛАШАЕМ СОТРУДНИКОВ ПРЕДПРИЯТИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ ПРОЙТИ ОБУЧЕНИЕ В ПИШ МГТУ ИМ. Н.Э. БАУМАНА!



engineers2030@bmstu.ru



www.bmstu.ru