

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук Краснобаева Юрия Вадимовича на диссертацию Севостьянова Никиты Алексеевича «**Модульная система электроснабжения космического аппарата с распределённым управлением**», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

### 1. Актуальность темы диссертации

Разработка современных космических аппаратов всегда являлась перспективным направлением мировой науки. На сегодняшний день в данной области можно выделить два ключевых направления, это разработка малых и сверхмалых космических аппаратов и разработка космических платформ. Предприятия аэрокосмического комплекса выпускают аппараты различного применения: навигации, связи, дистанционного зондирования земли, исследовательские и другие. Любой спутник представляет собой совокупность полезной нагрузки, обслуживающих систем и бортового комплекса связи и управления. Срок активного существования современного космического аппарата может достигать 15 лет, что ведет к ужесточению требований к надежности его систем. Одной из наиболее важных систем космического аппарата (КА) является система электроснабжения (СЭС), поскольку она обеспечивает электроэнергией как сами обслуживающие системы, так и полезную нагрузку, и ее выход из строя ведет к потере всего спутника.

Для снижения сроков проектирования, прототипирования и производства КА необходимо, чтобы как можно большее количество его составных модулей обладали свойствами унифицированности, масштабируемости и реконфигурируемости. То же касается и СЭС КА.

Унификация и модификация модульной СЭС КА оптимальным образом достигается при организации её системы управления по распределённой архитектуре, когда отсутствует центральный узел управления, локальная подсистема управления каждого отдельного модуля идентична подсистеме каждого из остальных модулей, а общее управление СЭС КА строится на принципе кооперации всех модулей. Такое построение полностью раскрывает преимущества и возможности масштабируемости и унифицируемости модульных СЭС КА. Тем не менее существует актуальная научная задача обеспечения высокого качества стабилизации напряжения общей шины СЭС КА с распределённым управлением.

Диссертационная работа Н. А. Севостьянова, в которой предложена и рассмотрена новая структурная схема распределённой системы управления СЭС КА, позволяющая улучшить динамические показатели качества стабилизации напряжения общей шины СЭС КА в сравнении с классической реализацией управления с мягкой внешней характеристикой и тем самым

сделать возможным применение таких систем управления в электроэнергетике космических аппаратов.

## **2. Анализ содержания диссертации и рекомендации использования**

Диссертационная работа изложена на 123 страницах и состоит из введения, 3 глав, заключения, списка терминов, списка литературы из 131 наименования, а также 4 приложений.

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

**Во введении** представлено обоснование актуальности диссертационной работы, обозначены цель и задачи исследования, сформулированы пункты научной новизны, теоретической и практической значимости работы, положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приведён ряд аналитических обзоров научно-технической литературы по тематике диссертационной работы. Проведён анализ конфигураций и архитектур СЭС КА и систем управления модульными СЭС КА, способов повышения качества напряжения в СЭС с распределённым управлением, а также современные требования к качеству стабилизации напряжения общей шины СЭС КА. Показаны основные преимущества модульных СЭС КА над классическими интегральными. Выявлено, что наиболее подходящей модульным СЭС КА архитектурой системы управления является иерархическая распределённая с кольцевой коммуникационной сетью между модулями. Определена основная характеристика СЭС КА, определяющая качество напряжения общей шины и устойчивость СЭС КА — импеданс. Как результат обосновываются формулировки цели, методов, объекта и предмета исследования.

**Во второй главе** проведено математическое моделирование силовых модулей СЭС КА аккумуляторных (АБ) и фотоэлектрических (ФБ) батарей. Представлена пошаговая структурная модификация контуров регулирования тока и напряжения с целью повышения качества напряжения общей шины. Предложены новые структуры 3-DOF регулятора и многовходового обобщённого интегратора, позволяющие повысить качество стабилизации напряжения общей шины как при неперiodических, так и при периодических воздействиях нагрузки.

**Третья глава** посвящена экспериментальному исследованию лабораторной СЭС КА, состоящей из двух силовых модулей. Проведены эксперименты по измерению частотных характеристик силовых модулей в отдельности и СЭС КА в целом, переходных процессов напряжения общей шины при неперiodических и при периодических воздействиях нагрузки. Продемонстрирована эффективность предлагаемой структуры системы управления.

**В заключении** представлены основные результаты и выводы по диссертационной работе.

**Приложения** содержат процедуры получения математической модели силового модуля АБ, параметрического синтеза регулятора мгновенного и среднего тока реактора силового модуля АБ, а также акты об использовании результатов диссертации и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Полученные в диссертационной работе результаты могут быть **рекомендованы** к использованию:

- в системах электроснабжения космических аппаратов различного назначения;

- в системах электроснабжения автономных объектов, в которых первичным источником энергии является солнечная батарея и к которым предъявляются повышенные требования к качеству выходного напряжения и надёжности функционирования.

### **3. Научная новизна, теоретическая и практическая значимость**

Обнаружена причина, из-за которой СЭС с иерархической распределённой системой управления обладают низким качеством стабилизации напряжения общей шины. Причина связана с применением регуляторов с одной степенью свободы (1-DOF) при регулировании выходного напряжения силовых модулей. Проведён параметрический синтез 3-DOF регулятора выходного напряжения силовых модулей, который позволил обойти эту причину и существенно улучшить качество стабилизации напряжения.

Для дальнейшего улучшения качества напряжения предложена новая структурная схема многовходового обобщённого интегратора, реализующую принцип частотно-избирательного подавления пульсаций напряжения и токораспределения.

Данные решения позволяют применять распределённое управление при проектировании модульных СЭС КА, тем самым способствуя переходу космической отрасли к серийному производству КА и их компонентов.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследования также подтверждается применением их при выполнении разработки и исследования бортовой энергопреобразующей аппаратуры с микропроцессорной системой управления и мониторинга космических аппаратов систем связи, дистанционного зондирования Земли и геодезии и договора на поставку рабочего места математического моделирования энергопреобразующей аппаратуры космических аппаратов с АО «РЕШЕТНЁВ», при выполнении грантов на разработку адаптивных алгоритмов управления распределёнными энергосистемами с открытой архитектурой и синтез алгоритмов цифрового управления модульной системой электропитания космических аппаратов, а также в программе развития ФГБОУ ВО «НГТУ» «Приоритет 2030». Результаты диссертации использовались в учебном процессе ФГБОУ ВО «НГТУ» при проведении занятий по курсам ДПО для сотрудников АО «РЕШЕТНЁВ» и некоторых компаний российской отрасли силовой электроники, что подтверждается соответствующими актами.

### **4. Публикации**

Основные результаты диссертационной работы представлены в 15 публикациях, 2 из которых опубликованы в журналах, рекомендованных

ВАК, 2 – в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, 10 – в тезисах докладов, зарегистрированы 3 программы для ЭВМ. Материалы диссертации достаточно полно отражены в печати.

#### **5. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций**

Достоверность и обоснованность выводов диссертационной работы подтверждается корректностью расчётных выражений, сходимостью результатов вычислительных и натурных экспериментов, полученных в ходе исследований лабораторной СЭС. Достоверность выводов подтверждается публикациями основных результатов работы в рецензируемых российских и зарубежных изданиях, а также обсуждениями на научных конференциях.

#### **6. Соответствие темы диссертации паспорту научной специальности**

Диссертация соответствует п. 2, 3, 4 паспорта специальности 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы».

В работе представлен анализ конфигураций и архитектур модульных СЭС КА и их систем управления (п. 2). Проведён параметрический и структурный синтез 3-DOF регулятора, а также предложена новая структурная схема многовходового обобщённого интегратора (п. 3), которые позволили существенно улучшить качество стабилизации напряжения общей шины. На лабораторной СЭС КА проведены натурные эксперименты, демонстрирующие работоспособность и эффективность предложенных решений по улучшению качества напряжения (п. 4).

#### **7. Замечания по диссертации**

1. Ряд разделов диссертации сложен для понимания, поскольку изложен излишне кратко. Кроме того в диссертации используется много терминов, не имеющих общепринятого применения.
2. В диссертации присутствуют ошибки в терминологии. Так используемый термин – «контроль статизма», является неточным переводом известного английского термина «droop control» и правильнее, применительно к управлению силовыми модулями, было бы перевести его как «управление статизмом», а рассматриваемый в качестве примера силовой модуль аккумуляторной батареи назван – «реверсивный двухтактный преобразователь», в то время как он является реверсивным однотактным преобразователем.
3. Проведены результаты натурных экспериментов с использованием лабораторной установки, состоящей из двух силовых модулей аккумуляторных батарей, питающихся от лабораторных источников напряжения. При этом результаты этих экспериментов необоснованно экстраполируются на силовые модули фотоэлектрических батарей, которые получают энергию от фотоэлектрических батарей, имеющих существенно нелинейные вольт-амперные характеристики.

4. В диссертации отсутствует информация об исследованиях совместной параллельной работы большего, чем два, числа силовых модулей аккумуляторных батарей, а также об исследованиях совместной параллельной работы нескольких силовых модулей фотоэлектрических батарей, что не позволяет однозначно сделать выводы о достоверности результатов, полученных теоретически, при большем количества силовых модуле в составе системы электроснабжения.

## 8. Заключение

Диссертационная работа Севостьянова Н. А. является завершённой научно-квалификационной работой, содержащей новое решение актуальной научной задачи: обеспечение повышения технических характеристик систем электроснабжения космических аппаратов. Полученные результаты являются новыми, отмеченные замечания носят дискуссионный характер и не являются принципиальными. Считаю, что диссертационная работа «Модульная система электроснабжения космического аппарата с распределённым управлением» соответствует требованиям п. 9-14 Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (ред. от 25.01.2024 года), а её автор Севостьянов Никита Алексеевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы».

Официальный оппонент,  
профессор кафедры «Системы  
автоматики, автоматизированное  
управление и проектирование»  
ФГАОУ ВО «Сибирский  
федеральный университет», доктор  
техн. наук (05.09.03  
«Электротехнические комплексы и  
системы»), профессор

*Отзыв получен 25.09.2024  
с.с. / Давыдов М.А.*

*С отзывом ознакомлен 01.10.2024  
с.с. / Севостьянов Н.А.*

Краснобаев Юрий  
Вадимович  
сентября 2024 г.

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Сибирский федеральный университет»

Почтовый адрес: 660074, Красноярский край, г. Красноярск,  
ул. акад. Киренского 26, корп. 1, кафедра «Системы автоматизации, автоматизированное управление и проектирование»  
телефон: +7 (391) 2-912-235  
эл. адрес: ykrasnobaev@sfu-kras.ru