

На правах рукописи



СЕВОСТЬЯНОВ Никита Алексеевич

**Модульная система электроснабжения космического аппарата
с распределённым управлением**

Специальность 2.4.2 —
«Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет».

Научный руководитель: **Харитонов Сергей Александрович**,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Краснобаев Юрий Вадимович**,
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», профессор кафедры систем автоматизации, автоматизированного управления и проектирования

Осипов Александр Владимирович,
доктор технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», доцент кафедры промышленной электроники

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук

Защита состоится 17 октября 2024 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.347.07 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: Россия, 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте организации <https://www.nstu.ru>.

Автореферат разослан «___» сентября 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.347.07,
канд. техн. наук



Дыбко Максим Александрович

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

В настоящее время подход к неконвейерной сборке специализированных модулей для космических аппаратов (КА) по индивидуальным заказам оказывается малопродуктивным в условиях быстро растущего спроса на экономически эффективное производство множества КА разной мощности и функциональности. Необходим переход к серийному поточному производству, ставший в последние годы главной задачей ГК «Роскосмос». Эффективное поточное производство характеризуется гибким подходом к разработке с коротким сроком перепроектирования, прототипирования и испытания, для чего необходимо, чтобы все модули КА, включая систему электроснабжения (СЭС) и её подсистемы, были унифицированными, масштабируемыми и реконфигурируемыми.

Унификация и модификация цифровых систем управления *централизованной* архитектуры, используемых в современных СЭС КА, сложна из-за необходимости трудоёмких схмотехнических, конструктивных и параметрических изменений: перерасчёт параметров системы управления, изменение числа каналов связи согласно числу силовых модулей (СМ), способному достигать нескольких десятков, или реализация низкоскоростной полудуплексной или даже симплексной связи с мультиплексированием через общую магистраль. Такие меры снижают надёжность и быстродействие системы управления, а следовательно, и качество стабилизации напряжения. Удачной альтернативой может стать *распределённая* архитектура систем управления. Существующие подходы к проектированию таких систем обеспечивают общую работоспособность системы, однако не позволяют достичь характерного для бортовых систем КА высокого качества напряжения в условиях динамических нагрузок.

Проведение данного исследования обусловлено необходимостью повышения качества напряжения в СЭС КА с распределённой системой управления, что определило направление исследования, его цель и задачи.

Объект исследования – модульная СЭС КА постоянного тока с непрерывно стабилизируемой общей шиной и иерархической распределённой цифровой системой управления с кольцевой коммуникационной сетью.

Предмет исследования – связь структуры и параметров системы управления СЭС КА с формой и величиной модуля импеданса СМ и общей шины.

Степень разработанности темы.

Тематика управления модульными СЭС в последнее десятилетие стимулируется развитием СЭС с распределённой генерацией электроэнергии (microgrids). Большой вклад в исследование таких систем внесли В. Ф. Дмитриков, А. Г. Фишов, А. Ф. Пашенко, Ю. Н. Булатов, Frede Blaabjerg, Josep M. Guerrero, Tomislav Dragičević, Miguel Castilla, Ali Davoudi. Исследовательский центр CROM (Дания) под руководством Josep M. Guerrero и Juan C. Vasquez – ведущий коллектив в этой области. Среди множества подходов к управлению СЭС с распределённой генерацией они предложили выделить один в качестве

общепринятого – *иерархическое управление с контролем статизма*. На данный момент подход стандартизирован и широко применяется в СЭС как постоянного, так и переменного тока, потому и был взят за основу в диссертационной работе.

В ряду способов повышения качества напряжения в СЭС с иерархическим управлением можно выделить несколько наиболее эффективных и жизнеспособных: активные силовые фильтры постоянного тока (Dushan Boroyevich, США), концепция виртуального импеданса (Paolo Mattavelli, Италия), управление с полосно-заграждающими фильтрами (Yun Wei Li, Китай). Их основные недостатки – дополнительные аппаратные затраты и акцент на управлении СЭС, связанных с централизованной сетью (grid-connected microgrids).

Перечисленные недостатки исключают возможность применения таких способов в СЭС КА в силу строгих требований к массо-габаритным показателям и качеству напряжения при различных сценариях поведения нагрузки, характеризующихся пульсирующими токами любой частоты и токов полного или частичного отключения и включения нагрузок. СЭС КА также является автономной системой, несвязанной с централизованной сетью (islanded microgrid) ввиду её отсутствия. Возникает необходимость дальнейшей разработки данной темы в сторону повышения качества напряжения в условиях динамических нагрузок.

Цель диссертационного исследования – улучшение динамических показателей качества стабилизации напряжения общей шины СЭС КА с иерархической распределённой системой управления путём её структурной и параметрической модификации.

Поставленная цель потребовала решить следующие **задачи**:

1. Проанализировать существующие требования к СЭС КА для установления ключевых характеристик, определяющих качество напряжения.
2. Исследовать динамические характеристики СЭС КА с иерархическим распределённым управлением при традиционной организации подсистем регулирования для выявления ограничений, не позволяющих удовлетворить требованиям к качеству напряжения.
3. Выполнить структурно-параметрическую модификацию системы иерархического распределённого управления СЭС КА с целью удовлетворения требованиям к качеству напряжения.
4. Экспериментально верифицировать разработанную модификацию.

Методология и методы исследования.

Математические модели СМ – непрерывные линеаризованные с запаздыванием регулирования (Small-Aliasing Approximation), получены методами усреднения и линеаризации в пространстве состояний. Модели регуляторов – непрерывные с последующей дискретизацией методом трапеций (Tustin's Method). Модели анализировались методами теории линейных стационарных систем с применением математического аппарата передаточных функций и частотных характеристик. Устойчивость определялась на основании критерия устойчивости Найквиста и импедансного критерия устойчивости каскадных систем.

Научные положения верифицировались экспериментами на лабораторном стенде. Экспериментальные данные анализировались методами цифровой обработки сигналов в среде JupyterLab средствами библиотеки NumPy (Python). Символьные вычисления проводились в системе компьютерной алгебры SageMath.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Иерархическая распределённая система стабилизации напряжения общей шины СЭС КА при традиционной организации подсистем регулирования с одной степенью свободы (1-DOF) – ошибкой регулирования – неспособна обеспечить импеданс общей шины ниже общего коэффициента статизма. При этом в случае низкоимпедансной шины, применяемой в СЭС КА средней и большой мощности, требуемые показатели качества напряжения теоретически могут обеспечиваться только при недопустимо низком коэффициенте статизма, недостаточном для равномерного токораспределения между СМ.

2. В иерархической распределённой системе стабилизации напряжения СЭС КА задание ей разного быстродействия при регулировании выходного напряжения СМ и при контроле статизма с помощью регулирования с тремя степенями свободы (3-DOF) позволяет достичь импеданса общей шины СЭС КА ниже общего коэффициента статизма и таким образом установить компромисс между качеством напряжения и равномерностью токораспределения между СМ.

3. Введение обобщённого интегратора (резонансного звена) в состав регулятора выходного напряжения СМ позволяет уменьшить амплитуду пульсаций напряжения общей шины СЭС КА, порождаемых пульсирующим током нагрузки. Механизм уменьшения пульсаций основан на снижении модуля выходного импеданса СМ на собственной частоте обобщённого интегратора, обладающего на этой частоте теоретически бесконечным коэффициентом усиления.

4. Добавление к обобщённому интегратору отрицательной обратной связи с током нагрузки СМ позволяет регулировать величину модуля выходного импеданса СМ на собственной частоте интегратора и благодаря чему равномерно распределять гармонические составляющие тока между СМ, например, в пропорции их номинальных выходных мощностей. При реализации такой связи необходимо воспользоваться структурой многовходового обобщённого интегратора, в противном случае токовая связь исказит частотные характеристики выходного импеданса СМ вблизи собственной частоты интегратора, снизив общую устойчивость СЭС и возбудив нежелательные интергармонические колебания.

Научная новизна:

1. Впервые обнаружена *причина* низкого качества напряжения общей шины СЭС с иерархической распределённой системой управления с контролем статизма, из-за которой невозможно обеспечить импеданс общей шины ниже общего коэффициента статизма – осуществление контроля статизма с помощью регулирования с одной степенью свободы – ошибкой регулирования.

2. Проведён *параметрический синтез* регулятора выходного напряжения СМ с тремя степенями свободы: уставка выходного напряжения, выходные ток и напряжение СМ – позволяющий задать разное быстродействие системы управ-

ления при регулировании выходного напряжения СМ и при контроле статизма, что позволяет обеспечить импеданс общей шины ниже общего коэффициента статизма. Для лабораторной СЭС 100 В / 250 Вт удалось обеспечить импеданс общей шины ниже 0,18 Ом при общем коэффициенте статизма 0,5 Ом и заданной верхней границы импеданса 0,8 Ом.

3. Предложена *структура многовходового обобщённого интегратора*, особенностью которого является возможность индивидуального формирования фазового сдвига для каждого входного воздействия. Интегратор позволяет уменьшить пульсации напряжения, не искажая частотные характеристики системы вблизи собственной частоты, сохраняя устойчивость и не возбуждая интергармонические колебания. В эксперименте для лабораторной СЭС эффект снижения размаха пульсаций напряжения составил 47% при воздействии тока нагрузки с пульсациями меандрической формы частоты 200 Гц и размаха 1 А.

4. Предложен *алгоритм частотно-избирательного токораспределения*, построенный на идее регулирования модуля выходного импеданса СМ на собственной частоте многовходового обобщённого интегратора дополнительной цепью отрицательной обратной связи с током нагрузки СМ. Способ позволяет распределить гармонические составляющие тока между СМ в заданной пропорции, снижая рассогласование нагрузки. В эксперименте для лабораторной СЭС гармонические составляющие тока нагрузки распределились между силовыми модулями в пропорции 1:1,98 с коэффициентом вариации 0,3% при заданной пропорции 1:2.

Достоверность полученных результатов подтверждается удовлетворительной сходимостью полученных научных результатов с результатами физических экспериментов, проведённых на лабораторном стенде.

Теоретическая и практическая значимость:

1. Разработана методика параметрического синтеза иерархической распределённой системы управления СЭС с регулятором с тремя степенями свободы, позволяющая рассчитать параметры системы управления исходя из требований к верхней границе импеданса общей шины и запасам устойчивости, делая распределённое управление применимым к модульным СЭС КА, что может также положить начало освоению передовых архитектур, таких как многобортовые и пространственно распределённые СЭС.

2. Создана СЭС 100 В / 250 Вт, образованная двумя параллельно соединёнными по выходу на общей шине неизолированными неперевсивными двухтактными преобразователями, которая была использована в процессе экспериментальной верификации положений диссертации и может быть использована в дальнейших исследованиях.

3. Разработана программная реализация регулятора с тремя степенями свободы и многовходового обобщённого интегратора с использованием метода дискретизации по трапециям и алгоритма компенсационного суммирования Кэ́хэна, которая может быть использована в программном обеспечении микропроцессорных систем управления силовыми модулями СЭС КА.

Реализация научных результатов.

Результаты диссертационной работы использовались при выполнении:

1. Программы развития ФГБОУ ВО «НГТУ» на 2021-2030 гг. в рамках федеральной программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030».

2. ФЦП № 14.577.21.0198 «Разработка и исследование бортовой энергопреобразующей аппаратуры с микропроцессорной системой управления и мониторинга космических аппаратов систем связи, дистанционного зондирования Земли и геодезии» совместно с АО «РЕШЕТНЁВ».

3. Договора № 1825730101142217000241754/2430/21-ЕП-732/РМ «Рабочее место математического моделирования энергопреобразующей аппаратуры космических аппаратов» с АО «РЕШЕТНЁВ».

4. Гранта Президента РФ № МК-1676.2020.8 «Разработка адаптивных алгоритмов управления распределёнными энергосистемами с открытой архитектурой».

5. Гранта ФГБОУ ВО «НГТУ» № С21-21 «Синтез алгоритмов цифрового управления модульной системой электропитания космических аппаратов».

Результаты использовались при оказании консультационных услуг для АО «РЕШЕТНЁВ» (г. Железногорск, 2018 г.) по договору № ИСЭ-10-18 и в учебном процессе ФГБОУ ВО «НГТУ» при проведении лекционных, практических и лабораторных занятий по курсам ДПО для сотрудников ООО «АЕДОН» и ООО «КВ Системы» (г. Воронеж и г. Москва, 2021-2024 гг.):

1. Синтез микропроцессорных систем автоматического регулирования устройств силовой электроники.

2. Реализация встраиваемых систем управления вторичными источниками электропитания на базе микроконтроллеров реального времени.

3. Специальные алгоритмы управления преобразователями постоянного напряжения.

Апробация научных результатов.

Основные результаты работы обсуждались на научных семинарах кафедр электроники и электротехники ФГБОУ ВО «НГТУ» (г. Новосибирск, 2021, 2023, 2024 гг.), АО «РЕШЕТНЁВ» (г. Железногорск, 2021, 2023 гг.) и ФГБУН «ИПУ РАН» (г. Москва, 2022 г.); научном семинаре по проблемам авиационно-космической электроэнергетики имени академика В. С. Кулебакина (г. Москва, 2019, 2022 гг.); IEEE SCPES (г. Новосибирск, 2020-2021 гг.), а также докладывались на международных конференциях IEEE ICDCM (г. Арлингтон, США, 2021 г.), IEEE ECCE-Asia (Сингапур, 2021 г.), IEEE EDM (г. Новосибирск, 2018-2021 гг.), Решетнёвские чтения (г. Красноярск, 2022 г.), Электронные средства и системы управления (г. Томск, 2021 г.) и всероссийской конференции Наука. Технологии. Инновации (г. Новосибирск, 2018-2020, 2023 гг.). Программный модуль измерения частотных характеристик (программа для ЭВМ № 2021665973) отмечен золотой медалью на XXV Международном салоне изобретений и инновационных технологий АРХИМЕД-2022.

Исследование отмечено стипендией Президента РФ молодым учёным и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики (2022-2024 гг.), премией мэрии г. Новосибирска в сфере науки и инноваций (2022 г.) и премией им. академика В. С. Кулебакина в области авиационной и космической электроэнергетики для молодых учёных (2022 г.).

Личный вклад.

Постановка задач исследования, формулирование научных положений и выводов, анализ и обобщение результатов осуществлялись автором совместно с научным руководителем С. А. Харитоновым и консультантом Р. Л. Горбуновым. Все теоретические и практические результаты работы получены, систематизированы и верифицированы автором лично.

Публикации.

Основные результаты по теме диссертации изложены в 15 печатных изданиях, 3 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.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность и кратко изложена степень разработанности темы диссертации; выделены цель, объект и предмет исследования; обобщены основные научные результаты и положения, выносимые на защиту; выделена теоретическая и практическая значимость исследования.

В первой главе проведён ряд аналитических обзоров, раскрывающих современное состояние области СЭС КА и степень разработанности тематики систем управления ими. Рассмотрены и классифицированы существующие конфигурации и архитектуры СЭС КА, архитектуры систем управления СЭС КА и способы повышения качества напряжения общей шины СЭС, выделены их основные преимущества и недостатки. Проанализированы ключевые требования к качеству напряжения общей шины СЭС КА на основе известных международных стандартов ISPSIS, ECSS-E-ST-20С и JERG-2-200-TP001. По результатам анализа в качестве объекта исследования была выбрана перспективная модульная архитектура СЭС КА с непрерывно стабилизируемой общей шиной электропитания и распределённой системой управления, подсистемы регулирования которой строятся по иерархическому принципу (hierarchical control), с коммуникационной сетью между СМ топологии типа «кольцо», а в качестве предмета исследования – импеданс общей шины как ключевая характеристика СЭС КА, определяющая качество напряжения и устойчивость системы.

Во второй главе представлены результаты математического моделирования СЭС КА и процедура структурно-параметрического синтеза распределённой системы управления.

В параграфе 2.1 описана структурная схема модульной СЭС КА с непрерывно стабилизируемой шиной и кольцевой коммуникационной сетью между СМ (рисунок 1). Параллельно соединённые по выходу на общей шине СМ выполняют роль полупроводниковых преобразователей электроэнергии первичных источников – фотоэлектрических (ФБ) и аккумуляторных (АБ) батарей – в постоянное напряжение общей шины СЭС. Один или несколько (при необходимости) СМ, работающих от одного первичного источника энергии, вместе с источниками объединяются в каналы электроснабжения, имеющие на выходе конденсаторные фильтры (КФ). Бортовая аппаратура (БА) вместе с входными фильтрами и/или интерфейсными СМ БА объединяются в каналы электропотребления. Каждая ФБ разделяется на N индивидуально коммутируемых секций. АБ также могут состоять из нескольких индивидуально модулируемых секций, в том числе с возможностью установки разбаланса токов заряда и разряда секций.

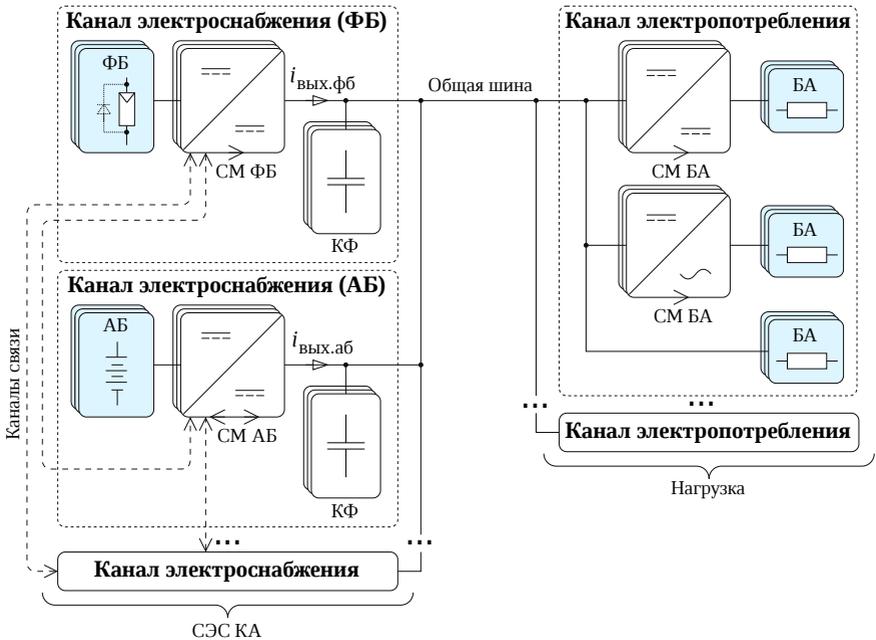


Рисунок 1 — Структурная схема модульной СЭС КА

По результатам математического моделирования СМ ФБ и СМ АБ (параграф 2.2) и синтеза контуров регулирования их выходных токов (параграф 2.3) представлена обобщённая модель СМ (рисунок 2), благодаря которой появляется возможность не обращать внимание на различия видов первичных источников энергии на входе СМ (ФБ или АБ), топологий силовой части, алгоритмов коммутаций и регуляторов тока при синтезе внешних контуров регулирования.

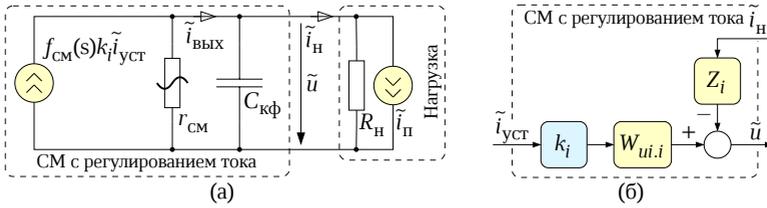


Рисунок 2 — Обобщённая модель СМ с регулированием тока в форме: а) схемы замещения и б) структурной схемы

В параграфе 2.4 введена структурная схема одного канала рассматриваемой иерархической распределённой системы управления СЭС КА с контролем статизма (droop control) и наблюдателем напряжения общей шины (рисунок 3). Иерархическое управление содержит три уровня. На 2-м уровне распределённый наблюдатель (рисунок 3, б) оценивает напряжение общей шины исходя из информации об аналогичной оценке двух соседних СМ и о собственном выходном напряжении, после чего из разницы между уставкой напряжения общей шины $U_{o,уст}$ и его оценки $\hat{u}_o(s)$ регулятор $G_o(s)$ формирует уставку выходного напряжения СМ $\tilde{u}_{уст}(s)$. Далее на 1-м уровне контролируется статизм снижением уставки на величину $r \tilde{i}_H(s)$. Затем на 0-м уровне, исходя из разницы между сниженной уставкой напряжения и выходным напряжением СМ регулятор с одной степенью свободы (1-DOF) $G_u(s)$ формирует уставку выходного тока СМ $\tilde{i}_{уст}(s)$.

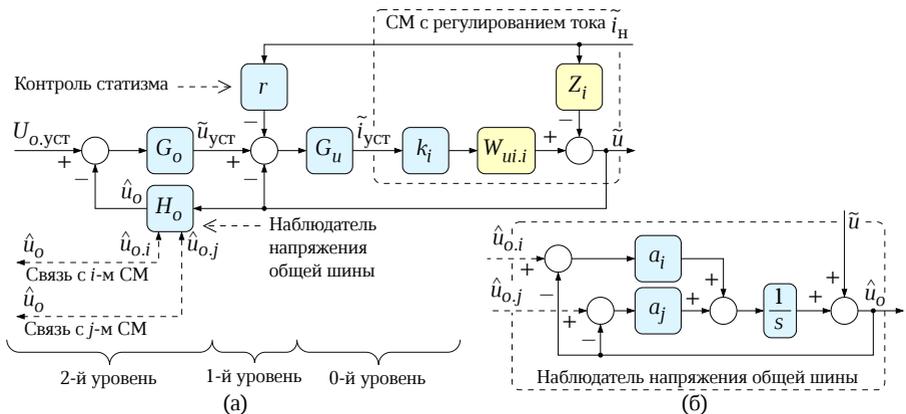


Рисунок 3 — Структурные схемы: а) канала распределённой иерархической системы управления СЭС для одного СМ, б) наблюдателя напряжения общей шины

Наблюдатель напряжения общей шины основан на протоколе динамического усреднённого консенсуса (dynamic average consensus) для многоагентных систем с распределённым кооперативным управлением. В диссертации показано, что алгоритм динамического усреднённого консенсуса является алгоритмом

наблюдения арифметического среднего выходных напряжений СМ, что при пренебрежении падением напряжения на бортовой кабельной сети (БКС) КА совпадает с напряжением общей шины.

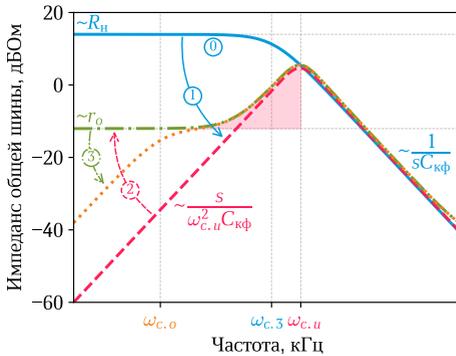


Рисунок 4 — Импеданс общей шины при различных конфигурациях системы управления

невозможно обеспечить импеданс общей шины ниже общего коэффициента статизма $r_o \stackrel{\text{def}}{=} r_1 || r_2 || \dots || r_M$, где M – общее количество параллельно соединённых по выходу на общей шине СМ. Чем выше r_o , тем более равномерное токораспределение между СМ, но хуже качество напряжения. Проблема является следствием того факта, что динамика контроля статизма полностью определяется динамикой регулирования выходного напряжения СМ в силу использования в контуре регулирования выходного напряжения СМ 1-DOF регулятора $G_u(s)$.

Данная проблема решается заменой регулятора $G_u(s)$ и коэффициента статизма r на регулятор с тремя степенями свободы (3-DOF), позволяющего задать системе управления разное быстродействие при регулировании выходного напряжения СМ и при контроле статизма (рисунок 5).

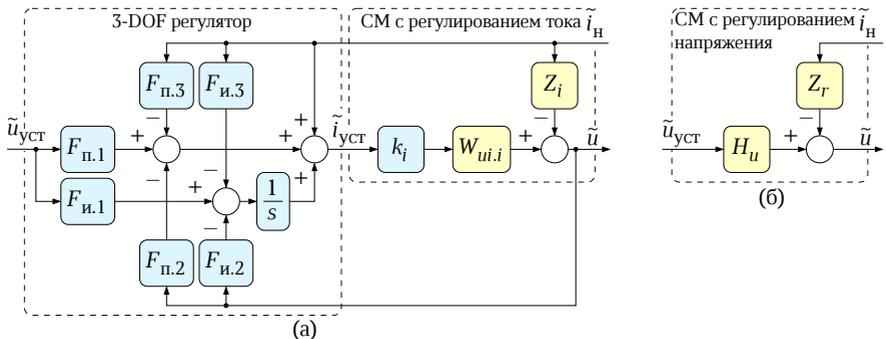


Рисунок 5 — Структурная схема контура регулирования выходного напряжения СМ с 3-DOF регулятором: а) развёрнутая и б) свёрнутая

В качестве степеней свободы использованы:

1. Положительная прямая связь с уставкой выходного напряжения СМ $\tilde{u}_{уст}(s)$, задаваемой регулятором напряжения общей шины СЭС КА $G_o(s)$.
2. Отрицательная обратная связь с выходным напряжением СМ $\tilde{u}(s)$.
3. Отрицательная обратная связь с током нагрузки СМ $\tilde{i}_н(s)$.

Параметры 3-DOF регулятора рассчитываются исходя из требуемых частот среза, определяющих быстродействие системы управления при регулировании напряжения, $\omega_{c,u}$, и при контроле статизма, $\omega_{c,r}$:

$$\begin{aligned} F_{п.1} &= \omega_{c,u} C_{кф,p}, & F_{и.1} &= \omega_{c,u} \omega_{c,r} C_{кф,p}, \\ F_{п.2} &= (\omega_{c,u} + \omega_{c,r}) C_{кф,p}, & F_{и.2} &= \omega_{c,u} \omega_{c,r} C_{кф,p}, \\ F_{п.3} &= r \omega_{c,r} C_{кф,p}, & F_{и.3} &= r \omega_{c,r} \omega_{c,u} C_{кф,p}, \end{aligned}$$

где $C_{кф,p}$ – расчётная ёмкость КФ, выбирающаяся из условия

$$C_{кф,p} > \frac{4\omega_{c,u}\omega_{c,r}}{(\omega_{c,u} + \omega_{c,r})^2} C_{кф,max};$$

$C_{кф,max}$ – максимальная ёмкость КФ в начале срока активного существования КА.

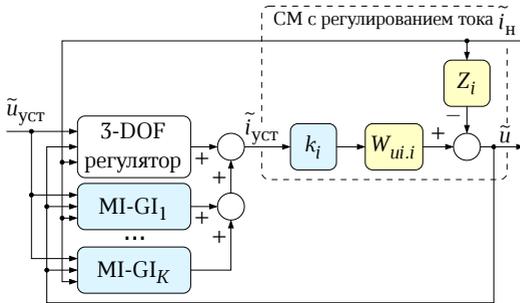


Рисунок 6 — Структурная схема контура напряжения СМ с 3-DOF регулятором и каскадом MI-GI общим звеном GI

В параграфе 2.4 предложен способ частотно-избирательного подавления пульсаций напряжения общей шины с использованием каскада многовходовых обобщённых интеграторов (multi-input generalized integrator – MI-GI, рисунок 7), выход которого – линейная комбинация входов с индивидуальными фазовращателями (phase shifter – PS) и

$$y(s) = G_{GI}(s) [\tilde{u}_{уст}(s)G_{PS}(s, \phi_b) - \tilde{u}(s)G_{PS}(s, \phi_a) - r_s \tilde{i}_н(s)G_{PS}(s, \phi_r)],$$

где $G_{GI}(s) = K_s \frac{s}{s^2 + \omega_s^2}$ – передаточная функция GI;

$G_{PS}(s, \phi) = \cos \phi - \frac{\omega_s}{s} \sin \phi$ – передаточная функция PS;

ω_s – собственная частота MI-GI;

K_s – пропорциональный коэффициент MI-GI;

ϕ – фазовый сдвиг фазовращателя на частоте ω_s .

Новая структура MI-GI позволяет обеспечить теоретически бесконечный коэффициент усиления в прямом канале системы управления, при этом не вызывая присущие обычному GI искажения частотных характеристик вблизи собственной частоты, которые могут привести к появлению нежелательных интергармонических колебаний или даже вывести систему из устойчивости.

Благодаря отрицательной обратной связи MI-GI с током нагрузки через коэффициент r_s возникает возможность устанавливать модуль выходного импеданса СМ равным этому коэффициенту и тем самым обеспечивать равномерное распределение гармонической составляющие тока нагрузки на частоте ω_s в пропорции коэффициентов r_s по аналогии с контролем статизма.

В параграфе 2.5 представлен параметрический синтез регулятора напряжения общей шины $G_o(s)$, результатом которого являются расчётные соотношения для ПИ-регулятора

$$K_{и.о} = \omega_{с.о}, \quad K_{п.о} = \frac{1}{k_{u/o}},$$

где $k_{u/o} \stackrel{\text{def}}{=} \omega_{с.и} / \omega_{с.о}$ – кратность частот среза контуров напряжения СМ $\omega_{с.и}$ и напряжения общей шины $\omega_{с.о}$.

Кратности частот среза контуров напряжения общей шины и напряжения СМ $k_{u/o}$ и частот среза контуров напряжения и тока СМ, $\omega_{с.и}$, $k_{i/u} \stackrel{\text{def}}{=} \omega_{с.и} / \omega_{с.и}$ выбирается исходя из принципа подчинённого регулирования $k_{u/o} > 3$ и $k_{i/o} > 3$ так, чтобы минимизировать их взаимовлияние. Кратность частот среза контура напряжения общей шины и контроля статизма СМ, $\omega_{с.г}$, выбирается исходя из требования к максимальному значению импеданса общей шины, $Z_{o,max}$, $k_{o/r} \stackrel{\text{def}}{=} \omega_{с.о} / \omega_{с.г} > (r_o / Z_{o,max}) - 1$.

В главе 3 описаны результаты экспериментального исследования. Научные положения диссертации экспериментально проверялись на лабораторной СЭС 100 В / 250 Вт (рисунок 8), образованной двумя параллельно соединёнными по выходу СМ топологии неизолированного неревверсивного двухтактного преобразователя (повышающие), работающих от индивидуальных лабораторных источников напряжения.

Первое и второе положения диссертации проверялись измерением ЛАЧХ импеданса общей шины СЭС при 1-DOF и при 3-DOF регулировании (рисунок 9). Максимум импеданса общей шины СЭС с 1-DOF регулированием на 140% превысил общий коэффициент статизма ($r_o = 0,5$ Ом), что подтверждает *первое поло-*

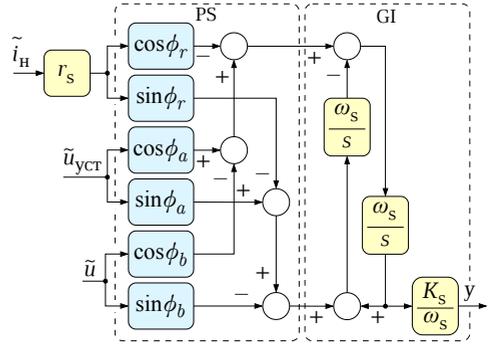


Рисунок 7 — Структурная схема MI-GI

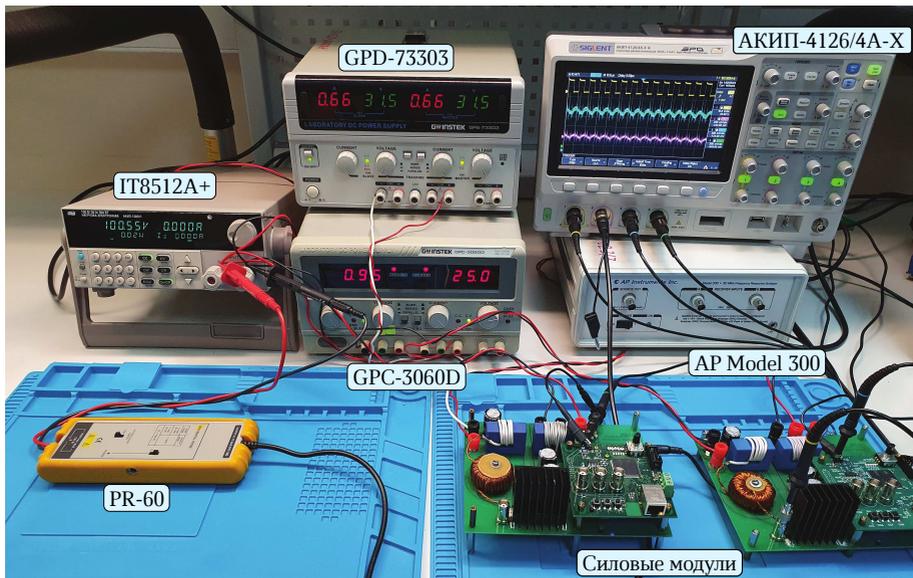


Рисунок 8 — Фотография лабораторного стенда

жение диссертации. Реализация системы управления с 3-DOF регулированием снизила максимум импеданса до величины на 63% меньше общего коэффициента статизма, тем самым подтверждая *второе положение*.

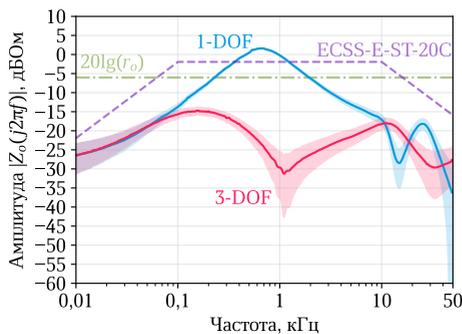


Рисунок 9 — ЛАЧХ импеданса общей шины

нагрузки на частоте 200 Гц между СМ была задана $r_{s,2(200\text{ Гц})} : r_{s,1(200\text{ Гц})} = 2$. В эксперименте кратность отличалась от расчётной на 1% и равнялась 1,98, что подтверждает *четвёртое положение*.

Примечание – К измеренным осциллограммам применялся фильтр скользящего среднего для устранения естественных пульсаций. Порядок фильтра равнялся кратности частоты дискретизации осциллографа и частоты коммутаций СМ: $f_{\text{осц}} / f_{\text{к}} = 20\text{ МГц} / 100\text{ кГц} = 200$.

После добавления в систему управления двух MI-GI с собственными частотами 200 Гц и 600 Гц размах пульсаций напряжения общей шины, вызванных ступенчатыми переключениями электронной нагрузки между двумя уровнями стабилизованного тока 0,5 А и 1,5 А с частотой 200 Гц, уменьшился на 47%. В свою очередь это подтверждает *третье положение* диссертации. Кратность деления гармонической составляющей тока нагрузки

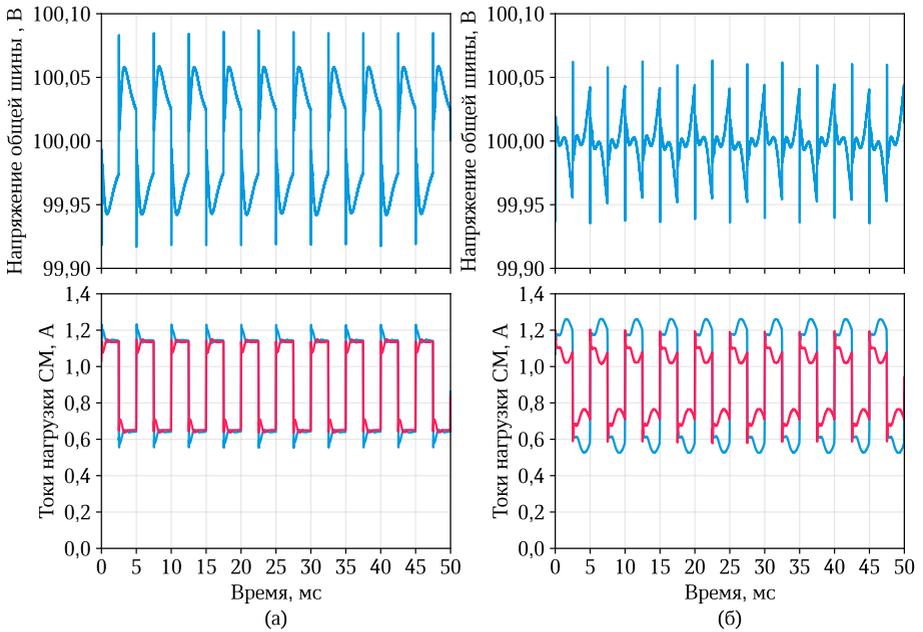


Рисунок 10 — Переходные процессы напряжения общей шины и токов нагрузки СМ при периодических воздействиях нагрузки: а) при 3-DOF регулировании, б) с MI-GI

Заключение

Анализ существующих научных публикаций, государственных программ и исследовательских работ предприятий космической отрасли показал высокий интерес к модуляризации КА и их подсистем, включая СЭС. В первую очередь это связано с процессом перехода от неконвейерного производства к серийному поточному для удовлетворения растущего коммерческого спроса. Степень модуляризации подсистем КА определяет эффективность серийного производства, характеризующегося высокой гибкостью процессов проектирования, прототипирования, сборки и испытания КА.

Распределённые системы управления обладают высоким уровнем автономности, масштабируемости и реконфигурируемости – важных свойств для организации серийного производства КА. Проведённое исследование решило важную задачу повышения качества напряжения модульной СЭС КА с иерархическим распределённым управлением в условиях динамических нагрузок, что создаёт возможность применения распределённых систем управления в СЭС КА.

Наиболее оптимальной для серийного производства архитектурой СЭС КА оказалась модульная архитектура с кольцевой коммуникационной сетью между СМ. Топология коммуникационной сети типа «кольцо» обладает необходимой

устойчивостью к единичному отказу и разреженностью, позволяя реализовать кооперативное управление СМ с минимальным числом каналов связи.

В работе распределённая система управления СЭС строилась на основе принципа иерархического управления с контролем статизма и алгоритма распределённого наблюдения напряжения общей шины на основе консенсуса. Такая организация управления позволяет обеспечить одновременно стабилизацию напряжения общей шины и равномерное токораспределение между СМ. Тем не менее качество напряжения при иерархическом управлении остаётся неудовлетворительным в следствии контроля статизма.

В ходе исследования было обнаружено, что низкое качество напряжения при иерархическом управлении связано с традиционной организацией подсистем регулирования на основе регуляторов с одной степенью свободы. Проблема разрешилась структурно-параметрическим синтезом регулятора с тремя степенями свободы, позволившего задать разное быстродействие системы управления при регулировании выходных напряжений СМ и при контроле статизма. Благодаря этому удалось снизить чувствительность системы управления к изменениям тока нагрузки в цепи контроля статизма и тем самым повысить качество напряжения.

Качество напряжения также может снижаться из-за воздействия высокоамперных пульсирующих токов мощной БА КА, что приводит к завышению требований к быстродействию системы управления СЭС и параметрам пассивных фильтров и интерфейсных СМ, что отрицательно сказывается на общей устойчивости, помехоустойчивости и массо-габаритных показателях СЭС. Предложенный в работе способ частотно-избирательного подавления пульсаций напряжения с помощью MI-GI позволяет безопасно ослабить наибольшие составляющие пульсаций напряжения общей шины без повышения быстродействия стабилизации напряжения и увеличения параметров фильтров. Структура MI-GI также позволяет равномерно распределять гармонические составляющие тока нагрузки между СМ, снижая тем самым рассогласование нагрузки.

В первую очередь полученные научные результаты эффективны в СЭС с непрерывно стабилизируемой общей шиной, чаще применяемых в больших КА, эксплуатирующихся на орбитах выше низкой околоземной, однако отдельные элементы могут быть применены и в низкоорбитальных КА, в которых общая шина СЭС стабилизируется только в отдельных режимах работы. Впрочем, область применения результатов не ограничена космическими системами: их можно применить и в СЭС общего назначения как с распределённым, так и с децентрализованным или централизованным иерархическим управлением.

Отдельные элементы диссертации, такие как структура MI-GI и методика расчёта её параметров, также обладают потенциалом применения и в СЭС переменного тока или гибридных СЭС, как при использовании MI-GI для подавления пульсаций, источники которых могут быть любой природы, так и для астатического регулирования инверторов/выпрямителей в стационарной системе координат.

Круг возможных направлений дальнейших исследований по тематике распределённого управления модульными СЭС охватывает:

- адаптивную подстройку собственных частот MI-GI при изменении спектра тока нагрузки;
- исследование влияния пульсирующих токов на характеристики и срок службы первичных источников энергии при частотно-избирательном подавлении пульсаций напряжения;
- переходы СЭС КА между режимами работы;
- анализ аварийных режимов.

Публикации автора по теме диссертации

В изданиях из перечня ВАК РФ

1. *Севостьянов, Н. А.* Иерархическое распределённое управление модульной системой электроснабжения космического аппарата [Текст] / Н. А. Севостьянов, С. А. Харитонов // *Электротехника*. — 2024. — Т. 2. — С. 48—59.
2. *Севостьянов, Н. А.* Система управления силовыми преобразователями в составе автономного электроагрегата постоянного тока [Текст] / Н. А. Севостьянов, Д. А. Штейн, Д. А. Курочкин // *Электропитание*. — 2021. — Т. 4. — С. 4—16.
3. *Севостьянов, Н. А.* Импедансный подход к синтезу системы стабилизации преобразователей постоянного напряжения в составе энергопреобразующей аппаратуры космических аппаратов [Текст] / Н. А. Севостьянов, Р. Л. Горбунов // *Электропитание*. — 2019. — Т. 3. — С. 15—27.

В изданиях, входящих в международную базу цитирования Web of Science

4. *Sevostyanov, N. A.* Control Strategy to Mitigate Voltage Ripples in Droop-Controlled DC Microgrids [Text] / N. A. Sevostyanov, R. L. Gubernov // *IEEE Transactions on Power Electronics*. — 2023. — Vol. 38, no. 12. — P. 15377—15389.

В изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus

5. *Sevostyanov, N. A.* Hierarchical Distributed Control of Modular Spacecraft Electrical Power System [Text] / N. A. Sevostyanov, S. A. Kharitonov // *Russian Electrical Engineering*. — 2024. — Vol. 95. — P. 141—151.

Зарегистрированные программы для ЭВМ

6. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ.* Программный модуль измерения частотных характеристик [Текст] / Р. Л. Горбунов [и др.] ; ФГБОУ ВО НГТУ. — № 2021665973 ; заявл. 06.10.2021 ; опубл. 06.10.2021, 2021665333 (Рос. Федерация).

7. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ. Модуль расчета коэффициентов пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора [Текст] / Н. А. Севостьянов ; Н. А. Севостьянов. — № 2023687258 ; заявл. 09.12.2023 ; опубл. 13.12.2023, 2023687164 (Рос. Федерация).*
8. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ. Модуль определения частоты при внутрисхемном измерении частотных характеристик [Текст] / Н. А. Севостьянов ; Р. Л. Горбунов, Н. А. Севостьянов. — № 2024613044 ; заявл. 08.02.2024 ; опубл. 01.01.2024, 2024610488 (Рос. Федерация).*

В сборниках трудов конференций

9. *Севостьянов, Н. А. Двукратное регулирование напряжения в системе электроснабжения космического аппарата с цифровой системой управления [Текст] / Н. А. Севостьянов, Р. Л. Горбунов // Сборник трудов конференции – Решетнёвские чтения. — 2022.*
10. *Севостьянов, Н. А. Синтез системы управления параллельными преобразователями постоянного напряжения с монотонными переходными процессами [Текст] / Н. А. Севостьянов, Р. Л. Горбунов, И. В. Александров // Сборник трудов конференции – Электронные средства и системы управления. — 2021.*
11. *Sevostyanov, N. A. An Improved Droop-Control Strategy to Provide Flat Output Impedance of Power Converters in DC Microgrids [Text] / N. A. Sevostyanov, R. L. Gorbunov // Proceedings – International Conference on DC Microgrids (ICDCM). — 2021.*
12. *Sevostyanov, N. A. Resonant Controllers Design for Frequency-Selective Impedance Controlled DC Microgrids [Text] / N. A. Sevostyanov, R. L. Gorbunov // Proceedings – International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). — 2021.*
13. *Sevostyanov, N. A. Current Sharing in Decentralized DC Microgrids with Frequency-Selective Impedance Control [Text] / N. A. Sevostyanov, R. L. Gorbunov // Proceedings – Energy Conversion Congress and Exposition - Asia (ECCE Asia). — 2021.*
14. *Gorbunov, R. L. Frequency-Selective Impedance Control for DC Microgrids [Text] / R. L. Gorbunov, N. A. Sevostyanov, D. A. Shtein // Proceedings – International Ural Conference on Electrical Power Engineerings (UralCon). — 2020.*
15. *Sevostyanov, N. A. Predictive Digital Current Programmed Control with Load Current Compensation for DC-DC Converters [Text] / N. A. Sevostyanov, R. L. Gorbunov // Proceedings – International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). — 2020.*

16. *Sevostyanov, N. A.* Experimental Verification of the Impedance-Based Approach for the Feedback Loop Design of the DC-DC Converter [Text] / *N. A. Sevostyanov, R. L. Gorbunov* // Proceedings – International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). — 2019.
17. Step-by-Step Design of the Digital Closed Loop System of the Boost Voltage Converter [Text] / *N. A. Sevostyanov [et al.]* // Proceedings – International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). — 2018.
18. Design Rules of the DC-DC Voltage Converter with the Two-Loop Feedback System [Text] / *R. L. Gorbunov [et al.]* // Proceedings – International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). — 2018.

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр-т Карла Маркса, 20. Тел. +7 (383) 346-08-57
Формат 60 × 84 1/16. Объём 1,25 п.л. Тираж 100 экз.
Заказ № Р-03402. Подписано в печать 07.06.2024 г.