

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук Краснобаева Юрия Вадимовича на диссертацию Кабирова Вагиза Александровича
«Энергопреобразующий комплекс с резервированной цифровой системой управления для высоковольтных систем электропитания космических аппаратов»,

представленную на соискание ученой 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 является система электропитания, поскольку она обеспечивает электропитание как самих обслуживающих систем, так и полезной нагрузки, и ее выход из строя ведет к потере всего спутника.

Для снижения себестоимости разработки и производства энергопреобразующего комплекса (ЭПК) системы электропитания применяется подход с использованием блочно модульной структуры на основе ограниченного количества типовых унифицированных блоков, рассчитанных на разную мощность, таких как: энергопреобразующие модули аккумуляторной и солнечной батарей, модули управления и модули выходного фильтра. Снижение числа типовых унифицированных блоков, рассчитанных на разную мощность, ведет к дальнейшему снижению себестоимости ЭПК.

Важной задачей при проектировании космических аппаратов и ЭПК, в частности, является повышение удельных характеристик и повышение его тактико-технических характеристик. Известно, что цифровые системы управления позволяют уменьшить объем занимаемой СУ за счет высокой степени интеграции цифровых микросхем. Переход на цифровые системы управления также позволяет увеличить сложность выполняемых алгоритмов управления, например, реализовать адаптивное управление, что в конечном итоге приведет к повышению функциональных возможностей ЭПК. Поэтому работы, связанные с внедрением прямого цифрового управления в ЭПК, являются актуальными.

Диссертационная работа В.А. Кабирова, в которой предложена и рассмотрена структурная схема энергопреобразующего комплекса на основе единого унифицированного модуля стабилизации напряжения с резервированием и прямым цифровым управлением, позволяющая ускорить процесс проектирования и производства энергопреобразующих комплексов, и космических аппаратов в целом, снизить издержки производства, повысить технические и удельные характеристики, надежность и степень резервирования, являются несомненно актуальной.

2. Анализ содержания диссертации и рекомендации использования

Диссертационная работа изложена на 209 страницах и состоит из введения, четырёх глав, заключение, списка литературы из 154 наименований, а также четырех 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 приведен обзор научно-технической литературы по тематике диссертационной работы. Проведен анализ энергопреобразующих комплексов систем электропитания космических аппаратов тяжелых спутниковых платформ. Выявлено, что в современные энергопреобразующие комплексы изготавливаются по блочно-модульному принципу построения на основе унифицированных модулей с применением аналоговых систем управления. Проведено сравнение цифровых и аналоговых систем управления. Предложена структура системы автоматического регулирования, которая позволяет создать энергопреобразующие комплексы систем электропитания космических аппаратов на основе унифицированных модулей с цифровым управлением.

Во второй главе приведена предложенная структурная схема энергопреобразующего комплекса на основе унифицированного модуля стабилизации напряжения с резервированием и прямым цифровым управлением. Описан алгоритм работы энергопреобразующего комплекса в различных режимах, а также приведено математическое описание блоков структурной схемы. Построена упрощенная аналитическая модель для определения минимальной емкости выходного фильтра, предложен многоканальный элемент выбора медианного сигнала, разработана и исследована в среде Mathcad имитационная модель цифрового ШИМ с асинхронным изменением регистра сравнения, позволяющая повысить динамические свойства импульсных преобразователей.

Третья глава посвящена имитационному моделированию энергопреобразующего комплекса на унифицированных модулях стабилизации напряжения с резервированной цифровой системой управления в среде Matlab/Simulink. Для моделирования используются непрерывные

модели импульсных преобразователей, полученные с использованием метода коммутационно-разрывных функций (КРФ). Доказана адекватность указанного подхода построения имитационной модели.

В четвертой главе предложена конструкция модуля стабилизации напряжения и разработана ее 3D модель, разработан цифровой интерфейс связи, объединяющий модули в единый ЭПК, реализована аппаратная часть управления силовыми ключами двунаправленного преобразователя зарядно-разрядного устройства.

В заключении представлены основные результаты и выводы по диссертационной работе.

Приложения содержат скрипт для получения частотных характеристик каналов энергопреобразующего комплекса, а также описание блоков имитационной модели.

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

- в системах электропитания космических аппаратов различного назначения;

- в системах электропитания 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

Предложенная структурная схема системы автоматического регулирования энергопреобразующего комплекса позволяет создавать энергопреобразующие комплексы из автономных унифицированных модулей стабилизации напряжения и ступенчато наращивать их выходную мощность параллельным включением модулей, обеспечивая многократное резервирование функциональных узлов ЭПК, данное решение может быть применено при построении систем электропитания различного назначения.

Несмотря на то, что научно-технические результаты работы имеют выраженный прикладной характер, автором получены и значимые теоретические результаты. В частности, установлена количественная связь величины емкости выходного фильтра с частотой работы импульсного преобразователя, его выходным импедансом и запасом по фазе контура обратной связи по напряжению.

Предложен цифровой ШИМ с асинхронным изменением содержимого регистра сравнения, с частотой позволяющий повысить динамические характеристики энергопреобразующих устройств с прямым цифровым управлением.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследования также подтверждается применением их при выполнении комплексного проекта по созданию высокотехнологического производства «Разработка бортового энергопреобразующего комплекса с цифровым резервированным

управлением для высоковольтных систем электропитания космических аппаратов с применением российской импортозамещающей электронной компонентной базы» (договор № 02.G25.31.0182 от 01.12.2015 г. между АО «ИСС» и Минобрнауки РФ), а также внедрены в учебном процессе кафедры «Промышленная электроника» ТУСУРа, что подтверждается соответствующими актами о внедрении.

4. Публикации

Основные результаты диссертационной работы представлены в 27 публикациях, 6 из которых опубликованы в изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus, 2 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 17 – в материалах конференций, получены два патента РФ на полезную модель. 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 расчетных выражений, сходимостью результатов вычислительных, имитационных и натуральных экспериментов, полученных в ходе исследований энергопреобразующего комплекса. 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. 1, 2, 3, 4 паспорта специальности 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы».

В работе представлен обзор энергопреобразующих комплексов сторонних производителей и применяемых структурных схем, предложена новая структурная схема энергопреобразующего комплекса и разработана его имитационная модель (**п. 1**). На имитационной модели исследована работа комплекса в различных режимах работы, в том числе и при типовых внешних воздействиях (**п. 4**) таких как сброс и наброс нагрузки. Показано что реализация комплексов на основе автономных унифицированных модулей позволит сократить время изготовления энергопреобразующих комплексов для различных задач за счет снижения типов применяемых модулей (**п. 2**). Исключение выходного фильтра как отдельного модуля приводит к увеличению удельных характеристик комплекса в целом за счет уменьшения массы конструктивных элементов. Разработанный алгоритм работы цифрового широтно-импульсного модулятора (**п. 3**) позволяет повысить динамические характеристики контуров управления, что приводит к снижению требований к выходному фильтру импульсных преобразователей, применяемых в энергопреобразующем комплексе и как следствие к увеличению удельных характеристик комплекса в целом.

7. Замечания по диссертации

1. В диссертации рассматривается стабилизирующий модуль мощностью в 850 Вт. При этом не приводится пояснений почему выбрана именно такая мощность модуля.
2. При рассмотрении конструкторской реализации силового модуля стабилизации напряжения (раздел 4.1) выходной емкостной фильтр показан в виде единого блока (см. рис. 4.1). Однако в разделе 2.1 каждый силовой модуль имеет индивидуальный выходной емкостной фильтр, названный $\Phi 100$. В каждом силовом модуле именно напряжение с собственного фильтра $\Phi 100$ участвует в формировании индивидуального сигнала рассогласования по напряжению. По причине наличия кабелей, соединяющих силовые модули по выходу, имеющих различные индуктивные и активные сопротивления, и по причине временного (фазового) сдвига процессов в силовых модулях, индивидуальные сигналы рассогласования по напряжению будут различны. Наличие кабелей, объединяющих силовые модули по выходу, не учитывается в моделях, приведённых в диссертации, и не ясно как это может повлиять на достоверность полученных результатов.
3. Значительный, более чем в 40 раз, рост величины выходного импеданса ЭПК (см. рис. 3.44 и 3.45) в диапазоне частот 1 – 100 Гц, т.е. на частотах много ниже частоты единичного усиления, видимо позволяет судить о низкой эффективности контура стабилизации выходного напряжения на частотах воздействия в 10 – 100 Гц, поскольку в этом диапазоне частот силовые модули ЭПК должны компенсировать приращение тока нагрузки, обеспечивая близкое к нулю значение тока через выходной емкостной фильтр, т.е. близкий к нулю выходной импеданс.
4. Для смены режимов работы ЭПК применён известный принцип выделения трёх поддиапазонов внутри диапазона изменения сигнала управляющего воздействия – сигнала рассогласования по напряжению. Однако информация о выбранной ширине диапазона изменения сигнала управляющего воздействия в диссертации отсутствует, в то время как выбор ширины диапазона изменения сигнала управляющего воздействия важен, т.к. при значительной ширине этого диапазона будет значительная статическая ошибка стабилизации выходного напряжения ЭПК, а при малой ширине этого диапазона возможна одновременная работа ЭПК в двух режимах из-за пульсации сигнала управляющего воздействия, вызванного импульсным принципом действия силовых преобразователей ЭПК. Из материалов диссертации не ясно на основе каких соображений была выбрана ширина диапазона изменения сигнала управляющего воздействия.

8. Заключение

Диссертационная работа Кабирова В. А. является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему по обеспечению повышения технических характеристик систем электропитания космических аппаратов. Полученные результаты являются новыми, отмеченные замечания носят дискуссионный характер и не являются принципиальными. Считаю, что диссертационная работа «Энергопреобразующий комплекс с резервированной цифровой системой управления для высоковольтных систем электропитания космических аппаратов» соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении учёных степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор Кабиров Вагиз Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы».

Профессор кафедры «Системы автоматки,
автоматизированное управление и
проектирование» ФГАОУ ВО «Сибирский
федеральный университет»,
доктор техн. наук, профессор

Краснобаев Юрий Вадимович

27 ноября 2023 г.

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

Почтовый адрес: 660041, Красноярский край, г. Красноярск,
ул. акад. Киренского 26, корп. 17, кафедра «Системы автоматки, автоматизированное
управление и проектирование»
телефон: +7 (391) 2-912-235
эл.адрес: ykrasnobaev@sfu-kras.ru

Отзыв получен
4 декабря 2023 г.
М. / Дыдыков М. А.

с отзудом ознакомлен
5.12.2023 г.

Кабиров В. А.