

## УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе

, д.т.н., проф.

В.К. Драгунов

11 2023 г.

ведуще

### **«ЭНЕРГОПРЕОБРАЗУЮЩИЙ КОМПЛЕКС С РЕЗЕРВИРОВАННОЙ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ»**,

представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности: 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

#### **1. Актуальность темы исследования**

Разработка систем электропитания космических аппаратов на базе унифицированных модулей представляет собой важный шаг в современной космической инженерии. Разработка систем электропитания для этих аппаратов обычно требует множества инженерных решений, времени и ресурсов. Решением данной проблемы является создание систем электропитания на основе унифицированных модулей, которые можно использовать для космических аппаратов с различной мощностью, характеристикой внутренних систем и полезной нагрузки. Такой подход позволяет создавать более эффективные и гибкие системы электропитания. Они обеспечивают возможность быстрого создания и модификации систем, что особенно важно в условиях быстро развивающейся космической индустрии. Стандартизация и унификация модулей также способствуют повышению надежности систем и снижению риска возникновения нештатных ситуаций, так как проверенные и подтвержденные в работе модули используются повторно. Другим преимуществом является облегчение обмена информацией между различными системами и аппаратами, что способствует созданию более совместимых и взаимозаменяемых компонентов. В диссертационной работе Кабирова В.А. предложена структурная схема энергопреобразующего комплекса на основе унифицированного модуля стабилизации напряжения с резервированием и прямым цифровым управлением, позволяющая ускорить процесс проектирования и производства энергопреобразующих комплексов, и космических аппаратов в целом, что позволяет считать ее несомненно актуальной

#### **2. Краткий обзор содержания диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списков сокращений и используемой литературы из 154 наименований и четырех приложений. Объем основной части работы, включая 27 таблиц и 121 рисунок, составляет 191 страницу.

**Во введении** обоснована актуальность тематики работы, определены основные цели и задачи. Так же сформулированы научная новизна и основные положения, выносимые на защиту. Отражена теоретическая и практическая ценность выполненных исследований и полученных результатов диссертации.

**В главе 1** представлен обзор энергопреобразующих комплексов, внедряемых в системы электропитания космических аппаратов. Показано, что современные энергопреобразующие комплексы базируются на различных унифицированных типах модулей и обладают схожей структурой систем автоматического регулирования. Предложена новая структура САР для разработки энергопреобразующих комплексов на основе унифицированных модулей стабилизации напряжения, управляемых цифровым способом.

**В главе 2** представлена полная структурная схема энергопреобразующего комплекса на базе унифицированных модулей стабилизации напряжения. Определена зависимость емкости выходного фильтра от параметров импульсного преобразователя, его выходного импеданса и запаса по фазе в контуре обратной связи по напряжению. Также предложен и реализован быстродействующий многоканальный элемент выбора медианного сигнала, позволяющий разрабатывать на его основе ЭПК, рассчитанные на два и более отказа. Предложен цифровой широтно-импульсный модулятор, позволяющий уменьшить максимальное время запаздывания, вызванной модулятором.

**В разделе 3** рассматривается синтез корректирующих звеньев зарядно-разрядного канала и канала регулирования солнца энергопреобразующего комплекса. Приводится экспериментальное подтверждение соответствия частотных характеристик разомкнутых контуров регулирования теоретическим частотным характеристикам, а также достижение заданных значений выходного импеданса. Приводится обоснованное упрощение импульсных моделей энергопреобразующих каналов до нелинейных непрерывных моделей. Также в главе приведено описание полной имитационной модели энергопреобразующего комплекса, включающего семь модулей стабилизации напряжения, и экспериментальное подтверждение выполнения алгоритма минимального количества циклов глубины разряда аккумуляторных батарей, а также обеспечения требуемого выходного импеданса в различных режимах работы энергопреобразующего комплекса.

**В разделе 4** рассмотрена практическая реализация технических решений, обеспечивающих миниатюризацию и повышение удельных характеристик при создании модулей стабилизации напряжения, а также практическая реализация технических решений, заявленных в научной новизне.

**В заключении** приведены выводы и изложены основные результаты работы.

В целом порядок изложения материалов исследования позволяет рассматривать диссертацию, как единое целое и логически завершенное

исследование, направленное на создание энергопреобразующего комплекса нового типа с цифровым управлением и глубоким резервированием.

### **3. Новизна, обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Научная новизна заключается в следующем:

- Предложена структурная схема системы автоматического регулирования энергопреобразующего комплекса, отличающаяся тем, что для каждого канала преобразования энергии реализован независимый контур обратной связи по выходному напряжению, а единый сигнал управления для подчиненного контура регулирования каждого канала выбирается многоканальными элементами выбора медианного сигнала, что позволяет создавать энергопреобразующие комплексы из автономных унифицированных модулей стабилизации напряжения и ступенчато наращивать его выходную мощность параллельным включением модулей, обеспечивая многократное резервирование функциональных узлов энергопреобразующих комплексов.
- 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 и его схемотехническое решение, в котором реализовано асинхронное изменение содержимого регистра сравнения, с частотой, превышающей частоту работы модулятора, что позволяет кратно снизить максимальное время чистого запаздывания, вносимое в контур регулирования, и повысить быстродействие цифровой системы управления.

Обоснованность научных положений, результатов и выводов работы находится на уровне требований, достаточном для кандидатской диссертации и подтверждается корректностью постановки задачи, обоснованностью принятых допущений, непротиворечивостью с результатами и выводами других разработок и исследований по обозначенным проблемам, а также подтверждается результатами экспериментальных исследований на имитационной модели.

### **4. Практическая ценность и внедрение результатов**

Полученные В.А. Кабиным результаты диссертационных исследований имеют практическую значимость, которая обуславливается тем, что использование разработанных моделей и технических решений позволит повысить эффективность разработки энергопреобразующих комплексов, которые могут быть применены не только в системах электропитания космических аппаратов, но и при проектировании других систем электропитания со статическими преобразователями энергии, имеющими модульную структуру.

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).

Результаты диссертационной работы также внедрены в производственный процесс АО «ИСС», а также в учебный процесс кафедры «Промышленная электроника» ТУСУРа, что подтверждается соответствующими актами.

#### **5. Полнота опубликования и апробации результатов работы**

По материалам диссертации опубликовано 27 работ, из которых 2 статьи в журналах из списка ВАК; 6 статей в изданиях, индексируемых базой данных Scopus; 17 работ в материалах всероссийских и международных конференций; получены два патента РФ на полезную модель.

#### **6. Замечания по диссертационной работе:**

1. Диссертация посвящена разработке ЭПК, однако, в ней не рассмотрены энергетические характеристики применяемых статических преобразователей напряжения.

2. Из материалов диссертации не понятно, можно ли на основе одного унифицированного модуля стабилизации напряжения создавать ЭПК для космических аппаратов, эксплуатируемых на различных орбитах?

3. Возникают вопросы по реализации предлагаемого модуля стабилизации напряжения (МСН) на отечественной элементной базе.

Указанные замечания не снижают положительного впечатления о диссертации в целом.

#### **7. Заключение о работе**

В целом, диссертация Кабирова В.А. является законченной научно-исследовательской работой, выполненной на актуальную тему, обладает научной новизной, содержит решения важных научно-технических задач, связанных с повышением эффективности разработки энергопреобразующих комплексов, которые могут быть применены не только в системах электропитания космических аппаратов, но и при проектировании других систем электропитания со статическими преобразователями энергии, имеющими модульную структуру.

Полученные результаты достоверны и достаточны для обоснования сделанных выводов и их практических применений. Выполненные исследования имеют теоретическую и практическую ценность. Апробация основных положений диссертации и количество публикаций достаточны. Содержание автореферата полностью и адекватно отражает сущность диссертации.

Диссертационная работа Кабирова Вагиза Александровича соответствует требованиям пункта 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы.

Результаты диссертационной работы Кабирова В.А. и отзыв на неё рассмотрены, обсуждены и одобрены на заседании кафедры промышленной электроники ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» 01.11.2023, протокол 3.

Присутствовало на заседании 18 человек профессорско-преподавательского состава. Результаты открытого голосования «за» – 18 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел.

Отзыв составлен д.т.н., доцентом, заведующим кафедрой промышленной электроники ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» Асташевым Михаилом Георгиевичем.

Заведующий кафедрой  
промышленной  
электроники ФГБОУ ВО  
«НИУ «МЭИ», д.т.н.,  
доцент

М.Г. Асташев

«21» ноября 2023г.

111250, Россия, г. Москва, ВН.ТЕР.Г. МУНИЦИПАЛЬНЫЙ ОКРУГ  
ЛЕФОРТОВО, УЛ КРАСНОКАЗАРМЕННАЯ, Д.14, СТР.1

Тел: +7 495 362-75-60

e-mail: [universe@mpei.ac.ru](mailto:universe@mpei.ac.ru)

Подпись Асташева Михаила Георгиевича удостоверяю.

Заместитель начальника ул  
по работе с персоналом  
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

Л.И. Полевая

«7» ноября 2023г.

М.П.

Отзыв написан  
01.12.2023  
м.п. / Довдго МА/

органом

Кабирова В.А.  
5.12.2023.