

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной деятельности
«Севастопольский государственный университет»

Евстигнеев М.П.

2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь на диссертацию Коровина Александра Владимировича на тему «Анализ и синтез автономной трехфазной системы электропитания с управлением кватернионом напряжения», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Актуальность темы диссертации

Одной из современных тенденций развития как отечественного, так и мирового энергетического комплекса является переход от централизованного производства электроэнергии к распределенным системам генерации (РСГ) низкого класса напряжения на основе преобразования энергии ветра, солнца и т. д. Как показывают статистические данные, в настоящее время доля возобновляемой энергетики в странах Европейского союза выросла с 74 ГВт в 2000 г. до 124–195 ГВт в 2020 г., чему способствовали более гибкая адаптация к изменению стоимости топливных ресурсов, снижение активных потерь

за счет внедрения новых энергосберегающих технологий, ужесточение экологических требований и т. д.

Принимая во внимание значительную протяженность территорий Российской Федерации с большим количеством труднодоступных районов, централизованное подключение к единой системе всех удаленных потребителей является нерентабельным. По этой причине развитие автономных РСГ, как с возобновляемыми источниками, так и с традиционными дизель-генераторными и газотурбинными установками, имеет важное технико-экономическое значение, что отмечено в плане мероприятий по реализации Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года, утвержденного Распоряжением № 1447-р от 01.06.2021 г., которая направлена на повышение энергоэффективности, надежности и качества энергоснабжения, а также сокращение избытков мощности.

Как показывает практический опыт эксплуатации данного рода трехфазных систем электропитания промышленных и коммунально-бытовых объектов, нелинейный и резкопеременный характер процессов в цепях нагрузки вызывает существенные искажения в мгновенной форме трехфазных напряжений, что негативно сказывается на других потребителях. Для исключения данного недостатка в диссертации Коровина А. В. предложено осуществить синтез РСГ на основании алгебры кватернионов, позволяющим в рамках классических многоконтурных структур с ПИ-регуляторами осуществлять отработку внешних возмущающих факторов с малым временем восстановления гармонического закона по отношению к существующим аналогам.

Принимая во внимание вышесказанное, диссертационное исследование Коровина А. В., посвященное разработке на основе гиперкомплексного представления трехфазных переменных алгоритмов управления автономной трехфазной системой электропитания, обеспечивающей нормированное качество генерируемой электрической энергии переменного тока в совокупности с высоким быстродействием, является актуальным.

Анализ содержания диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложения. Она содержит 121 страницу, из которых: 101 стр. – основной машинописный текст с 46 рисунками и 5 таблицами, включая оглавление, 15 стр. – библиографический список из 104 наименований.

В первой главе описано функциональное назначение и принцип действия основных элементов РСГ, а именно трехфазного инвертора на базе мостовой схемы с нулевым проводом, включая подробный анализ достоинств и недостатков различных способов ШИМ, силового LC/LCL-фильтра для исключения высокочастотных пульсаций в токах нагрузки, а также наиболее распространенных типов возобновляемых источников и накопителей электрической энергии. Как отмечено в данной части диссертационной работы, применительно к задачам электропитания автономных потребителей, топология преобразователя с четвертой стойкой, несмотря на более сложный алгоритм коммутации, обладает рядом достоинств по отношению к схемной конфигурации со средней точкой звена постоянного тока, что объясняется большим количеством разрешенных состояний силовых полупроводниковых ключей, а практическое внедрение в отечественном энергокомплексе технологии преобразования энергии солнечного излучения, ветра, изменения уровня моря и т. д. позволит существенно снизить топливную составляющую в себестоимости выпускаемой продукции.

Во второй главе, при общепринятых допущениях, представлена математическая модель переходных процессов в трехфазной РСГ с нулевым проводом после последовательно выполняемых координатных преобразований Кларка и Парка. На основании векторно-матричных дифференциальных уравнений в пространстве состояний были описаны базовые структуры типовых законов формирования управляющих воздействий, как в классе линей-

ных непрерывных САУ, так и с привлечением методов релейного, адаптивного и интеллектуального управления.

Третий раздел посвящен анализу и синтезу системы электропитания автономных объектов произвольного вида, в том числе однофазных, несимметричных, нелинейных и т. д., с использованием ассоциативной некоммутативной алгебры кватернионов, выступающей в качестве основы при разработке структурной концепции построения и организации управляющей части РСГ. В данной главе приведены аналитические выражения для технической реализации прямого перехода трехфазных переменных в координаты состояния α, β, o и d, q, o и обратно в терминах гиперкомплексных чисел без привлечения математического аппарата матричного исчисления, а также результаты аналитического исследования специального кватерниона произведения, позволяющего разделить генерируемые напряжения произвольной мгновенной формы на симметричную гармоническую составляющую прямой последовательности фаз и несимметричную мультигармоническую компоненту. В соответствии с разработанным способом декомпозиции была сформулирована инженерная методика структурно-параметрического синтеза алгоритмов управления РСГ, работоспособность которой была верифицирована методом цифрового моделирования в программе «MATLAB».

В заключительной четвертой главе описана экспериментальная часть диссертации, в рамках которой на полномасштабном макете исследовались качественные и количественные показатели функционирования РСГ, сопровождаемые автоматическим включением/выключением, а также ступенчатым изменением на уровне 30% от номинальной величины различного рода нагрузок, в том числе однофазных и нелинейных. Полученные результаты подтвердили адекватность принятой на начальном этапе математической модели системы, правильность результатов синтеза, а также их высокую эффективность. Отработка внешних возмущающих факторов производилась с незначительной динамической ошибкой, которая

достигалась за счет отдельного воздействия на симметричную синусоидальную составляющую прямой последовательности фаз генерируемых напряжений и всех отклонений от нее вследствие несимметричного и нелинейного характера процессов энергопотребления. При этом качество генерируемой электрической энергии удовлетворяло нормированным значениям в соответствии с ГОСТ Р 32144-2013.

Новизна исследования и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

В перечень основных научных результатов, выводов и рекомендаций, которые обладают научной новизной, входят:

1. Обобщенные формулы для построения блоков прямых и обратных координатных преобразований Кларка и Парка с использованием кватернионов, в том числе и при соблюдении требования инвариантности скалярных величин после выполненного перехода.
2. Новый способ разделения трехфазных напряжений произвольной мгновенной формы на симметричную синусоидальную составляющую прямой последовательности фаз и несимметричные мультигармонические компоненты, основанный на предварительном расчете специального кватерниона произведения.
3. Алгоритмы управления транзисторным инвертором с четвертой стойкой в составе автономной РСГ с формированием канала отрицательных обратных связей на основе декомпозиции кватерниона текущих значений генерируемых трехфазных напряжений.

Основные результаты диссертации и ее отдельные положения докладывались и обсуждались на Международных конференциях молодых специалистов по микро/нано технологиям и электронным приборам «EDM» (Республика Алтай, 2013-2014 гг.), XIII международной (XIX Всероссийской) и XI международной (XXII Всероссийской) конференциях по Автоматизиро-

ванному электроприводу (г. Саранск, 2014 г. и г. Санкт-Петербург, 2020 г.), а также научных семинарах кафедры Электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета. По теме диссертационного исследования опубликовано 8 печатных работ, в том числе 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ и 4 публикации, входящие в международные библиографические и реферативные базы данных «Scopus» и «Web of Science».

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений определяется корректной постановкой задач в рамках принятых допущений, применением математического аппарата ассоциативной некоммутативной алгебры кватернионов, верификацией результатов анализа и синтеза методом цифрового моделирования в программе «MATLAB», а также экспериментальным подтверждением работоспособности предложенных алгоритмических решений применительно к РСГ с различными типами нагрузок.

Практическая значимость работы

К практической значимости диссертации Коровина А. В. можно отнести следующее:

1. Алгоритмическую концепцию построения, организации и технической реализации быстродействующих РСГ с использованием четырехмерных гиперкомплексных чисел.
2. Аналитические зависимости для расчета одномерной скалярной и трехмерной векторной частей специального кватерниона произведения в наибо-

лее общем случае несимметрии напряжений как по амплитудному значению, так и по угловому смещению во всех трех фазах.

3. Инженерная методика структурно-параметрического синтеза алгоритмов управления мостовым инвертором с четвертой стойкой, обеспечивающая малое время восстановления гармонической мгновенной формы напряжения в условиях действия резкопеременных внешних возмущающих факторов со стороны нагрузки.

4. Структурная схема управляющего устройства РСГ, в которой совмещены преимущества традиционных методов синтеза линейных САУ с управлением кватернионом напряжения.

5. Использование результатов диссертационного исследования в учебном процессе ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», а также при производстве изделий в ООО «Энергозапас», г. Новосибирск и ПАО «НПО Алмаз», г. Москва.

Замечания по диссертации и автореферату

1. В ходе аналитического обзора топологий инвертора напряжения с нулевым проводом не рассмотрена мостовая схема с четвертой стойкой и средней точкой конденсаторной батареи звена постоянного тока.

2. В диссертации не произведен сравнительный анализ разработанного алгоритма с существующими аналогами, например, традиционными непрерывными ПИ-, ПИД-, П-регуляторами или разрывным управлением в скользящих режимах.

3. При моделировании и эксперименте величины индуктивностей дросселей в выходном LC-фильтре и нейтральной линии выбирались равными друг другу, хотя их функциональное назначение существенно различается.

4. В работе не описана аналитическая процедура конкретного выбора передаточной функции и параметров фильтра низких частот для выделения по-

стоянной составляющей из скалярной части специального кватерниона произведения.

5. В работе отсутствует обоснование необходимости включения в систему управления, изображенную на рисунке 3.2, компенсационных сигналов i_{ld}, i_{lq}, i_{lo} , которые можно исключить при помощи перехода к автоматическому регулированию токов конденсаторов силового LC-фильтра.

6. Экспериментальная верификация предложенной методики структурно-параметрического синтеза осуществлялась только на резистивной нагрузке с вентилями без применения реактивных элементов, которые широко распространены в реальных промышленных установках и технологических комплексах.

Вышеуказанные замечания в большей степени являются рекомендательными и не снижают общей положительной оценки диссертации.

Заключение

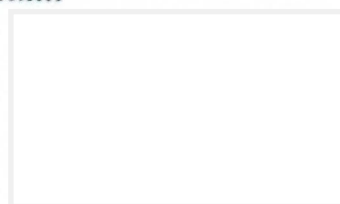
Диссертационная работа Коровина А. В. является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится новое техническое решение научной задачи, связанной с управлением силовым преобразовательным устройством в составе автономных трехфазных систем генерирования электрической энергии с нормированным качеством выходного напряжения.

Диссертация соответствует паспорту специальности в п.3 и п.4, а также п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013г. № 842, предъявляемым к диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, ее автор, Коровин Александр Владимирович, заслуживает присуждение ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы.

Диссертация и отзыв на неё обсуждены на заседании кафедры Электроэнергетические системы атомных станций федерального государственного

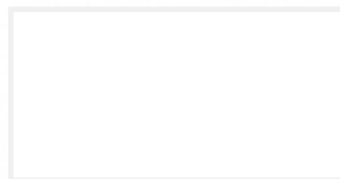
автономного образовательного учреждения высшего образования Севастопольский государственный университет (ФГАОУ ВО «СевГУ») (протокол №1 от 30.08.2022).

Заведующий кафедрой
электроэнергетических систем атомных станций
федерального государственного автономного
образовательного учреждения
высшего образования «Севастопольский
государственный университет»,
д.т.н., доцент



Завьялов Валерий
Михайлович

Секретарь заседания



Сенчик Ирина
Владимировна

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Севастопольский государственный университет»

Почтовый адрес: 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, д. 33

Официальный сайт: <https://www.sevsu.ru/>

e-mail: info@sevsu.ru

Тел.: +7 (8692) 43-52-92

Отзыв получен 31.08.2022 *М. / Давыд М.А.*

С отзывом ознакомлена *К.С. / С.Т. Кирова №1*
31.08.22