

ОТЗЫВ
официального оппонента

на диссертацию Пантелеева Станислава Владимировича “Улучшение энергетических и массогабаритных показателей системы «синхронный электрический генератор с девятифазной дробной зубцовой обмоткой – активный выпрямитель напряжения»”, представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы».

1. Соответствие диссертации специальности и отрасли науки, по которым она представлена к защите

Диссертация Пантелеева С.В. “Улучшение энергетических и массогабаритных показателей системы «синхронный электрический генератор с девятифазной дробной зубцовой обмоткой – активный выпрямитель напряжения»” соответствует паспорту специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы» по 1, 2, 3 пунктам области исследования (раздел III паспорта) и отрасли «технические науки».

2. Актуальность темы диссертации

Диссертационное исследование ставит целью исследование и создание научных оснований для построения высокоэффективных (высокий КПД и коэффициент мощности) электрических генераторов на базе синхронных электрических машин с постоянными магнитами, работающих в системе «электрический генератор – управляемый преобразователь электрической энергии». Данная задача в целом является современной и актуальной как с точки зрения общей энергетической эффективности электрических машин, так и, в особенности, в связи с необходимостью уменьшения массогабаритных показателей электрогенераторов и электропривода для современных летательных аппаратов, робототехнических систем, систем специального назначения и т.п.

Развитие ветрогенераторных установок, систем электроснабжения (СЭС) электромобилей, летательных аппаратов в т.ч. беспилотных для наземных и воздушных средств подвижности сопровождается ростом их мощности при определенном ограничении массогабаритных показателей. Процесс повышения требуемой мощности сказывается и на применяемых в их составе электрических генераторах. В частности, использование синхронных генераторов с дробными зубцовыми обмотками (СЭГ с ДЗО) и активных выпрямителей напряжения – признается одним из наиболее перспективных направлений.

Следует отметить, что имеются научно-технологические тенденции, придающие выбранному направлению исследования дополнительный вес, в частности, ожидаемый рост применения высокотемпературной сверхпроводимости в электротехнических системах.

Вх. № д-оп от 20.09.23
Курнос (А.В. Курнос)

Одним из актуальных направлений повышения эффективности процесса электромеханического преобразования энергии является использование энергии гармоник индукции магнитного поля третьего и более высоких порядков. В таком случае в генераторе необходимо использовать обмотку с числом фаз более трех. Многофазность обмотки позволяет избежать компенсации третьей временной гармоники ЭДС и обеспечивает трапецеидальный вид функции ЭДС. Особенности рабочих процессов в многофазных СЭГ с ДЗО с трапецеидальной ЭДС и вопросы их оптимального проектирования недостаточно изучены в литературе, что обуславливает актуальность вопросов, разрабатываемых в диссертационном исследовании.

В настоящее время разработано большое количество систем векторного управления током в синхронных электрических генераторах с постоянными магнитами. При этом для систем с трапецеидальной ЭДС отсутствует достаточная база систем векторного управления, а также исследования по оптимизации систем управления. Поэтому результаты данной диссертационной работы в части разработки способов управления током в многофазной обмотке генератора представляются важными.

Все вышесказанное указывает на актуальность диссертационного исследования Пантелеева С.В.

3. Степень новизны результатов диссертации и научных положений, выносимых на защиту

Последовательность задач решаемых в диссертационной работе, ее «архитектура», полностью соответствует цели исследования и образует последовательность взаимосвязанных научных результатов, характеризующихся высокой степенью новизны.

В главе 2 диссертации представлены математические модели многофазных СЭГ с ДЗО, отличающиеся учетом несинусоидальных законов изменения пространственных обмоточных функций и индукции магнитного поля в воздушном зазоре. Разработанные математические модели позволяют повысить достоверность и точность представления электромагнитных процессов в генераторе.

В 3-ей главе диссертации разработана методика параметрического синтеза многофазных СЭГ с ДЗО, основанная на использовании в качестве целевой функции минимума его удельной массы. При этом разработанная методика отличается тем, что в целевой функции учитываются высшие гармоники ЭДС, индуцированные несинусоидальным распределением индукции магнитного поля. Многофазность обмотки позволяет использовать энергию высших гармоник индукции магнитного поля и тем самым повысить КПД генератора. Показано, что в случае разрабатываемого 9-фазного варианта генератора возможно уменьшить удельную массу генератора на 20–23 % по сравнению с трехфазными аналогами при одинаковых электромагнитных нагрузках.

В главе 4 диссертации разработан способ векторного управления током в девятифазной обмотке генератора с трапецеидальной ЭДС. Указанный способ отличается независимым управлением пространственными гармоническими составляющими тока в рабочей обмотке фаз, что позволяет

согласованно менять токи в обмотках генератора отдельно компенсировать гармоники тока обратной последовательности фаз и выполнить регулирование коэффициента мощности по гармоникам прямой последовательности фаз.

В этой же главе диссертации также разработан новый способ пространственно-векторной модуляции напряжения девятифазного управляемого преобразователя электрической энергии. Разработанная методика отличается независимой реализацией четырех пространственных гармоник напряжения на одном периоде пространственно-векторной модуляции, что позволяет сформировать управляющие воздействия с неизменной частотой коммутации в системе векторного управления током в рабочей обмотке девятифазного генератора с трапецеидальной ЭДС.

Автор комбинирует различные известные методы моделирования генератора и релейно- векторного управления с прогнозирующей моделью в системе SIMULINK достигая решения поставленных задач по моделированию и оптимальному проектированию СЭГ с ДЗО и управляемым преобразователем электрической энергии (УПЭЭ).

4. Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Выводы и рекомендации, сделанные в диссертации получены на основе применения научно- обоснованных и принятых при исследовании электротехнических комплексов и систем теорий, программных средств, технических и математических методов, - это нерелятивистская электромагнитная теория, известные магнитные, электрические и диэлектрические свойства материалов, векторное и дифференциальное исчисление. При формулировке моделей магнитной индукции и ЭДС синхронного генератора с дробной зубцовой обмоткой проводится последовательное сравнение результатов аналитического и детального численного расчетов.

Сделанные выводы и рекомендации следуют из последовательного решения поставленных задач, согласуются между собой и не противоречат известным результатам других авторов в данной области науки и техники.

Достоверность разработанного способа векторного управления подтверждается незначительным расхождением результатов аналитического расчета, имитационного моделирования и экспериментальных исследований.

Погрешностей в применении математического аппарата и интерпретации результатов не выявлено.

5. Научная, практическая, экономическая и социальная значимость результатов диссертации с указанием рекомендаций по их использованию.

Научная значимость результатов заключается в развитии теории электромеханических преобразователей энергии и управляемых преобразователей электрической энергии, которая может быть использована для конструирования многофазных генераторов, отличающихся высоким КПД

и коэффициентом мощности.

В том числе:

разработана детальная математическая модель девятифазного СЭГ с ДЗО с активным выпрямителем напряжения, описывающая существенные особенности электромагнитных процессов в исследуемой СЭС – несинусоидальность пространственных обмоточных функций и индукции магнитного поля в зазоре;

получены новые зависимости и закономерности для девятифазных СЭГ с ДЗО при полигармоническом режиме работы, а именно: связь изменения обмоточного коэффициента и коэффициента дифференциального рассеяния с количеством зубцов статора и полюсов ротора; характер и количественные закономерности изменения коэффициента искажения формы индукции магнитного поля возбуждения от геометрических параметров магнитной системы - величины полюсного перекрытия и относительного открытия пазов статора;

В явном виде записаны уравнения, определяющие законы управления активным выпрямителем напряжения, позволяющие осуществить работу девятифазного генератора с трапецеидальной ЭДС с максимальной энергетической эффективностью.

Практическая значимость результатов.

В результате выполнения диссертационного исследования создана модель, позволяющая определять параметры и энергетические характеристики девятифазного СЭГ с ДЗО, производить конструирование соответствующих высокоэффективных генераторов, с учетом геометрии магнитопроводов, системы обмотки и других особенностей.

При использовании разработанной методики параметрического синтеза девятифазного СЭГ с ДЗО будет достигнуто улучшение коэффициента полезного действия СЭГ с ДЗО и связанное с этим улучшение массогабаритных показателей генератора на постоянных магнитах.

Разработанный механизм и метод векторного управления током в 9 – фазной обмотке позволяет приблизить коэффициент мощности генератора с трапецеидальной ЭДС к единице.

Практическая значимость полученных результатов исследования подтверждается двумя актами об их реализации и практическом использовании.

Экономическая значимость работы определяется прежде всего повышением технико -экономических характеристик генераторов типа СЭГ с ДЗО, работающих с управляемым преобразователем электрической энергии и связанных с этим расширением сфер их применения и потенциальной конкурентоспособности.

Разработанные модели системы «СЭГ с ДЗО – управляемый преобразователь электрической энергии», позволяет оперативно и с минимальными финансовыми затратами выполнять исследование, разработку и сравнение новых способов управления генераторов с многофазными обмотками, тем самым создавая преимущества при создании современных высокоэффективных генераторов электрической энергии.

Следует отметить, что улучшение массогабаритных показателей генераторов приводит к появлению новых видов техники и повышению

конкурентоспособности имеющейся техники, использующей бортовые генераторы.

Социальная значимость результатов диссертационного исследования определяется возможностью создания на их основе новых более эффективных и конкурентоспособных электромеханических преобразователей энергии в составе разнообразных транспортных средств, возобновляемых источников энергии, робототехнических устройств.

6. Опубликованность результатов диссертации в научной печати.

Основные научные результаты диссертации полностью опубликованы в 19 печатных работах, в том числе: 9 статьях в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК Республики Беларусь; 2 статьях в других рецензируемых журналах; 8 тезисах докладов и материалов конференций.

7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК.

Диссертация и автореферат диссертации оформлены в соответствии с Инструкцией, утвержденной постановлением ВАК РБ 28.02.2014 № 3 (в редакции постановления ВАК РБ 22.08.2022 № 5).

Материалы диссертации изложены последовательно в соответствии с сформулированными целями и задачами исследования. Существенных замечаний по форме и стилистике изложения не имеется. Автореферат хорошо отражает содержание самой диссертации.

8. Замечания по диссертации.

Диссертация практически не вызывает вопросов по логике, стилистике изложения и аккуратности представления результатов.

Из недостатков можно указать на отсутствие оценок влияния 3-х мерности на точность расчета магнитного поля, магнитного потока через катушки статора и др. параметров.

В работе недостаточно четко обозначены границы мощностного диапазона и геометрических конфигураций статора и ротора в котором применимы разработанные методики электромагнитного расчета и оптимального проектирования синхронного генератора.

В разделе 1.4 проводится анализ ряда систем векторного управления током синхронного генератора, делается заключение о целесообразности применения системы векторного управления с прогнозирующей моделью и ШИМ, однако отсутствует количественное сравнение, например, с распространенными для синхронных генераторов с трапецеидальной ЭДС системами управления коммутацией по датчику положения ротора.

В разделе 4.2.3 было бы желательно представить результаты имитационного моделирования исследуемой системы, касающиеся связи качества постоянного напряжения и числа фаз генератора.

Желательно было бы уточнить какие частоты дискретизации и какими аппаратными средствами (процессорами) практически реализуемы и оптимальны для алгоритмов, разработанных в разделе 4.2.

При обосновании применения девятифазной обмотки с.25 – 33 численные оценки и графики величин обмоточных коэффициентов дробных зубцовых обмоток, ЭДС холостого хода и т.п. приводятся в обобщенном виде без спецификации систем для которых выполнены оценки (число пазов, геометрия, схема обмоток, мощность и т.д.)

В разделе 4.3 при сравнении расчетных и экспериментальных значений параметров макетов 3-х и 9-ти фазных генераторов с дробной зубцовой обмоткой не уточнены средства которыми выполнено численное моделирование (Matlab/Simulink или иные программы).

Имеются отдельные описки, например: с.111 ссылка на рис. 2.23 (график 3); с.62 указаны гармоники 51 и 57, вместо 51 - 57 и некоторые др.

Сделанные замечания не снижают научной ценности и практической значимости полученных в диссертации результатов.

9. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует.

Анализ результатов, а также подходов и методов решения задач, сделанных выводов и, собственно, изложения материала исследования показывает, что научная квалификация Пантелеева С.В. соответствует ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы».

10. Заключительная часть отзыва о диссертации.

Диссертация Пантелеева С.В. “Улучшение энергетических и массогабаритных показателей системы «синхронный электрический генератор с девятифазной дробной зубцовой обмоткой – активный выпрямитель напряжения»” является законченной научной работой, выполненной на актуальную тему. Диссертация содержит новые, научно обоснованные, теоретические и экспериментальные результаты, которые относятся к решению важной научно-технической задачи – улучшение энергетических и массогабаритных показателей систем генерации электроэнергии.

Диссертация Пантелеева С.В. соответствует требованиям, установленным главой 3 Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы» за научные результаты, включающие:

математическую модель девятифазного СЭГ с ДЗО в полигармоническом режиме работы, отличающуюся учетом несинусоидальных законов распределения индукции магнитного поля в воздушном зазоре и изменения пространственных обмоточных функций, позволяющую представить его структуру как объекта управления совокупностью параллельных энергетических каналов;

разработанную методику параметрического синтеза девятифазного СЭГ с ДЗО, отличающуюся учетом в целевой функции «минимум удельной массы генератора» высших гармоник ЭДС в обмотке, индуцированных

несинусоидальным распределением индукции магнитного поля в воздушном зазоре. Предложенная методика позволяет выполнить синтез генератора с заданным КПД и минимальной удельной массой, значение которой на 20–23 % меньше, чем у трехфазного аналога при одинаковых электромагнитных нагрузках;

разработанный способ векторного управления током в девятифазной рабочей обмотке генератора, отличающийся реализацией независимого управления пространственными гармоническими составляющими тока посредством применения многоканальной структуры контура управления и схемы инжекции высших гармоник, а также алгоритмом девятифазной пространственно-векторной модуляции напряжения в обмотке управляемого преобразователя электрической энергии, обеспечивающим формирование управляющих воздействий с постоянной частотой коммутации, что позволяет обеспечить формирование в каждой фазе полигармонических токов, согласованных по форме и фазе с напряжением генератора и передать не менее 95 % активной мощности генератора в нелинейную нагрузку;

Официальный оппонент:
заведующий ОНИЛ “Инновационная энергетика” филиала Белорусского национального технического университета «Научно-исследовательский политехнический институт»
доктор физико-математических наук, профессор
Доброго Кирилл Викторович

«20» сентября 2023 г.



Личную подпись Доброго Кирилл Викторович заверяю.

Начальник отдела кадров филиала Белорусского национального технического университета «Научно-исследовательский политехнический институт»

Цыркунова Д.А.

20.09.2023

