

УТВЕРЖДАЮ

Ректор  
Белорусского государственного  
технологического университета  
И.В.Войтов

16 сентября 2023 г.

### ОТЗЫВ

оппонирующей организации – кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники учреждения образования «Белорусского государственного технологического университета» – о диссертации Пантелеева Станислава Владимировича “Улучшение энергетических и массогабаритных показателей системы «синхронный электрический генератор с девятифазной дробной зубцовой обмоткой – активный выпрямитель напряжения»”, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – “Электротехнические комплексы и системы”

**Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и отрасли науки.**

Содержание диссертации соответствует отрасли технических наук, паспорту специальности 05.09.03 – “Электротехнические комплексы и системы”, по пунктам 1,2 и 3 раздела III «Области исследований» паспорта специальности.

**Научный вклад соискателя в решение научной задачи и оценка его значимости.**

Соискателем обоснована возможность применения синхронных электрических генераторов с дробными зубцовыми обмотками (СЭГ с ДЗО) в девятифазном исполнении при условии управления током в обмотке. Применение девятифазной обмотки позволит:

А) решить проблему негативного влияния высших гармоник индукции магнитного поля на энергетические и эксплуатационные параметры генератора рассматриваемого типа;

Б) уменьшить удельную массу генератора.

Диссертация отличается применением комплексного подхода для достижения поставленной цели. Комплексный подход сочетает в себе изменение конструктивных параметров генератора и применение специальных способов управления полупроводниковым преобразователем. Каждая из составляющих подробно раскрыта в тексте диссертации, что в совокупности справедливо назвать «принципами реализации полигармонического режима работы синхронного электрического генератора с многофазной дробной зубцовой обмоткой». Научное направление по исследованию работы многофазных генераторов при полезном использовании высших гармоник магнитного поля в процессе преобразования энергии не развито. Поэтому диссертация вносит существенный вклад в развитие такого научного направления.

Вн № 1-010 от 19.09.23  
Крутов (А.В. Крутов)



Соискателем разработана аналитическая математическая модель синхронного электрического генератора с девятифазной дробной зубцовой обмоткой. Ее значимость заключается в возможности с высокой точностью определить влияние геометрических параметров магнитной цепи и схемы многофазной обмотки на величину и характер изменения функций ЭДС и индуктивностей при наименьших временных затратах. Заслуживают положительной оценки результаты экспериментальных исследований по проверке достоверности разработанной математической модели генератора. Эксперимент позволил автору подтвердить правильность и полноту теоретических положений, выносимых на защиту.

Разработана методика параметрического синтеза девятифазного СЭГ с ДЗО в полигармоническом режиме работы. Стоит отметить, что для решения многокритериальной задачи оптимизации генератора предложено использовать многоэтапную структуру методики с оригинальной системой целевых функций. Используемые критерии характеризуют полигармонический режим работы генератора, вполне обоснованы и находятся в одном классе. Применение разработанной методики позволяет свести векторный критерий к скалярному (минимуму удельной массы генератора), найти глобальный экстремум целевой функции и исключить необходимость применения трудоемких стохастических методов оптимизации для решения многокритериальных задач оптимизации генератора.

Соискателем разработан способ векторного управления в системе «девятифазный СЭГ с ДЗО – активный выпрямитель напряжения (АВН)». За прототип взят один из наилучших (по параметрам качества регулирования) способов прогнозирующего управления. Однако значимость заключается в расширении действия этого способа на девятифазный случай. Для этого решены несколько задач, которые характеризуются новизной и вносят научный вклад в развитие управляемых многофазных преобразователей напряжения: установлены законы управления в многоканальной структуре системы регулирования АВН для обеспечения полигармонического режима работы девятифазного генератора; определена структура периода модуляции, последовательность и функции изменения продолжительностей интервалов коммутации для применения управляющих воздействий в многоканальной системе регулирования по алгоритму пространственно-векторной модуляции.

Кроме того, соискателем разработана имитационная модель системы «девятифазный СЭГ с ДЗО – АВН», отличающаяся учетом высших гармоник напряжения генератора при определении управляющих воздействий для регулирования тока в его обмотке, а также отдельной и независимой реализацией гармонических составляющих управляющего сигнала для обеспечения полигармонического режима работы генератора. Значимость имитационной модели заключается в сокращении сроков разработки новых и модернизации существующих систем электроснабжения на базе девятифазных генераторов и АВН.



**Конкретные научные результаты (с указанием их новизны и практической значимости), за которые соискателю может быть присуждена искомая ученая степень.**

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, отличающуюся учетом несинусоидальных законов изменения индукции магнитного поля в воздушном зазоре и пространственных обмоточных функций, позволяющую представить процесс электромеханического преобразования энергии в генераторе в виде многоканальной структуры для реализации системы регулирования;

– методику оптимизации девятифазного СЭГ с ДЗО, отличающуюся учетом высших гармоник ЭДС, индуцированных несинусоидальным распределением индукции магнитного поля, позволяющую выполнить синтез генератора с минимальной удельной массой, значение которой на 20–23 % меньше, чем у трехфазного аналога;

– способ векторного управления током в девятифазной обмотке генератора с трапецеидальной ЭДС, отличающийся реализацией независимого управления пространственными гармоническими составляющими тока, позволяющий обеспечить значение интегрированного коэффициента мощности генератора по первой и третьей временным гармоникам не менее 0,95;

– способ пространственно-векторной модуляции напряжения девятифазного АВН, отличающийся отдельной и независимой реализацией доминирующих пространственных гармоник напряжения на одном периоде модуляции, позволяющий реализовать управляющие воздействия с постоянной частотой коммутации для обеспечения полигармонического режима работы девятифазного генератора.

#### **Замечания по диссертации.**

А). В подразделе 1.2.1 автор указывает, что рассматриваемая система электроснабжения постоянного тока обладает универсальной структурой и может служить элементом систем электроснабжения переменного тока и систем электростартерного запуска приводного двигателя. Этот вопрос следовало бы раскрыть более подробно и привести ряд примеров упомянутых случаев возможного применения.

Б). Из текста диссертации не в полной мере прослеживается обоснование выбора базовой конструкции исследуемого генератора: радиальное расположение постоянных магнитов на поверхности ротора; выполнение статора с полужакрытыми пазами; однослойная структура обмотки.

В). Учет влияния зубчатости магнитопровода статора в классических методиках проектирования электрических машин ведется с использованием коэффициента воздушного зазора (коэффициента Картера). Автор диссертации не



рассматривает этот общепринятый метод, а использует функцию модуляции МДС пазами статора без обоснования целесообразности ее применения.

Г). Автор рассмотрел в диссертации только установившийся режим работы системы электроснабжения. В силу особенностей работы, например, авиационных систем электроснабжения, необходимо было рассмотреть переходный режим работы.

Д). В разделе 4.2 и Приложении К не приведены имитационные модели систем «деятифазный СЭГ с ДЗО – АВН» в среде моделирования MATLAB Simulink, а представлены только их структурные схемы. Вследствие этого сложно оценить степень детализации входящих в модели элементов и принятых допущений.

Е). При имитационном моделировании выполнена проверка работы системы «деятифазный СЭГ с ДЗО – АВН» на активно-индуктивную нагрузку. Следовало бы рассмотреть различные виды нагрузки, поскольку представление нагрузки в виде R-L цепи является недостаточным.

Указанные замечания не снижают общую положительную оценку диссертации, ее научную и практическую значимость. Замечания Б), В), Е) следует рассматривать как рекомендации автору в дальнейшей работе, а замечания А), Б), Д) носят редакционный характер.

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

Автор диссертации Пантелеев С.В. провел детальный анализ результатов, полученных другими исследователями по научному направлению диссертации, качественно выполнил теоретические и экспериментальные исследования. Обсуждение диссертации, с учетом ответов соискателя на вопросы представителей кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники (АППиЭ) учреждения образования «Белорусского государственного технологического университета» (БГТУ), показало, что научная квалификация соискателя соответствует ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – “Электротехнические комплексы и системы”.

**Рекомендации по практическому использованию результатов диссертации.**

Полученные результаты диссертации могут быть использованы при разработке и проектировании синхронных электрических машин и управляемых преобразователей напряжения с улучшенными энергетическими и массогабаритными показателями.

Разработанная в диссертации методика параметрического синтеза  $m$ -фазной электрической машины с дробными зубцовыми обмотками реализована при разработке перспективных базовых мобильных быстроразвертываемых платформ в ОАО «ВОЛАТАВТО», о чем свидетельствует акт о практическом использовании от 09.02.2018. Разработанный в диссертации способ

пространственно-векторной модуляции для  $m$ -фазного АВН реализован в учебном процессе кафедры электротехники и систем электропитания учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь», о чем свидетельствует акт от 05.03.2018.

### Заключение.

Диссертация Пантелеева Станислава Владимировича «Улучшение энергетических и массогабаритных показателей системы «синхронный электрический генератор с девятифазной дробной зубцовой обмоткой – активный выпрямитель напряжения», является выполненной квалификационной научной работой. По степени научной и практической значимости, опубликованности и апробации полученных результатов работа соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемых к кандидатским диссертациям. Содержание диссертации соответствует отрасли технических наук и паспорту специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы».

Пантелеев С.В. заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы» за новые научные обоснованные теоретические и экспериментальные результаты в области теории электротехнических комплексов и систем, электрических машин и управляемых преобразователей напряжения.

Отзыв оппонировавшей организации, подготовленный экспертом доцентом кафедры АППиЭ БГТУ кандидатом технических наук, доцентом Гринюком Д.А., обсуждался на научном собрании с участием специалистов по научному направлению диссертации (протокол № 2 от 5 сентября 2023 г.), на котором соискатель ученой степени Пантелеев С.В. выступил с докладом по диссертации «Улучшение энергетических и массогабаритных показателей системы «синхронный электрический генератор с девятифазной дробной зубцовой обмоткой – активный выпрямитель напряжения»».

В открытом голосовании приняли участие члены научного собрания, имеющие ученые степени, в количестве 16 человек, из них 10 кандидатов технических наук. Голосовали: за – 16, против – 0, воздержалось – 0.

Председатель научного собрания:  
заведующий кафедрой АППиЭ БГТУ  
кандидат технических наук, доцент



Д.С. Карпович

Секретарь научного собрания:  
доцент кафедры АППиЭ БГТУ  
кандидат технических наук, доцент



И.О. Оробей

Эксперт оппонировавшей организации  
доцент кафедры АППиЭ БГТУ  
кандидат технических наук, доцент



Д.А. Гринюк