

### **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 (технические науки)

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

Содержание диссертации Пантелеева С.В. соответствует отрасли технических наук и формуле паспорта специальности 05.09.03, в части исследования общих закономерностей преобразования и использования электрической энергии, а также принципов и средств управления объектами, определяющих функциональные свойства действующих или создаваемых электротехнических комплексов и систем специального назначения. Область исследований соответствует пунктам 1-3 раздела III паспорта.

#### Актуальность темы диссертации

Диссертация Пантелеева С.В. посвящена совершенствованию системы «синхронный генератор – активный выпрямитель напряжения», улучшению ее энергетических и массогабаритных показателей. Так как развитие автономных объектов сопровождается непрерывным ростом их энерговооруженности, и в то же время на массу и габариты их систем электроснабжения (СЭС) накладываются ограничения, тему диссертации следует признать актуальной.

В представленной диссертации решается ряд вопросов, имеющих научный интерес и практическое значение. К таким вопросам можно отнести: уменьшение удельной массы и повышение коэффициента полезного действия синхронного электрического генератора с дробной зубцовой обмоткой (СЭГ с ДЗО); уменьшение коэффициента дифференциального рассеяния с одновременным повышением действующего значения ЭДС в СЭГ с ДЗО; уменьшение взаимной индуктивности между фазами обмотки статора, а также обеспечение постоянства функции собственной индуктивности от изменения угла поворота ротора СЭГ с ДЗО; обеспечение близкого к единице коэффициента мощности СЭГ с ДЗО с трапецеидальной ЭДС; компенсация в СЭГ с ДЗО с трапецеидальной ЭДС гармоник тока обратной последовательности фаз.

Основной проблемой, которая решается в диссертации, является наличие широкого спектра высших гармоник индукции в магнитном поле возбуждения СЭГ с ДЗО. В современной литературе известно много работ, посвященных решению такой проблемы путем увеличения числа фаз обмотки генератора. Но при этом недостаточно освещен вопрос полезного использования энергии высших гармоник индукции магнитного поля в процессе электромеханического преобразования энергии. Также известно, что при работе генератора с

*Вх № 1-01 от 18.09.23  
Сидоров (Н.С. Кривонос)*

трапецеидальной ЭДС на активно-индуктивную нагрузку (наиболее распространенный тип нагрузки) наблюдается несогласованность напряжения и тока генератора во временной области. Тогда не в полной мере обеспечивается передача активной мощности генератора в нагрузку. В соответствии с этим, развитие и совершенствование способов управления током в многофазной обмотке генератора с трапецеидальной ЭДС, а также методик электромагнитного расчета и параметрического синтеза многофазных СЭГ с ДЗО являются важными и актуальными научно-техническими задачами.

Степень новизны результатов, полученных в диссертации,  
и научных положений, выносимых на защиту

Новизна результатов, полученных в диссертации Пантелеева С.В., и научных положений, выносимых на защиту заключается в следующем:

1. Математическая модель девятифазного СЭГ с ДЗО в полигармоническом режиме отличается от известных учетом переменной магнитной проводимости воздушного зазора, несинусоидальных законов распределения индукции магнитного поля и девятифазной обмотки.

2. Методика параметрического синтеза многофазных СЭГ с ДЗО отличается от известных применением векторного критерия оптимальности, в котором учтены высшие гармоники индукции магнитного поля и ЭДС, и последовательностью приведения векторного критерия к скалярному – «удельная масса генератора».

3. Способ векторного управления током в девятифазной обмотке генератора отличается многоканальностью структуры контура регулирования тока и возможностью независимого регулирования четырех доминирующих гармоник тока.

4. Способ пространственно-векторной модуляции девятифазного напряжения отличается применением четырехкомпонентной структуры периода модуляции и отдельной реализацией управляющих воздействий в виде четырех гармоник напряжения на одном периоде модуляции.

Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций,  
сформулированных в диссертации

Достоверность сформулированных в диссертации выводов и рекомендаций подтверждается применением методов математического и компьютерного моделирования с использованием современного и апробированного программного обеспечения, а также численными расчетами, результаты которых согласуются с измерениями, полученными в ходе экспериментальных исследований.

Степень обоснованности выводов и рекомендации в диссертации достаточна, так как они получены в соответствии электромагнитными процессами, явлениями и теорией электрических машин и управляемых преобразователей напряжения.



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

Научная значимость результатов заключается в развитии общей теории электротехнических комплексов и систем, в части касающейся синхронных электрических генераторов на постоянных магнитах и активных выпрямителей напряжения применительно к многофазным системам.

Практическая значимость. В диссертации значительное внимание уделено практическим аспектам построения систем «синхронный генератор – активный выпрямитель напряжения», а именно проведению модельных и экспериментальных исследований предложенных решений. Математическая модель девятифазного СЭГ с ДЗО позволяет определить величины напряжений, токов и мощности с высокой степенью точности в полигармоническом режиме работы. Практическое применение методики параметрического синтеза девятифазных СЭГ с ДЗО позволяет уменьшить удельную массу генератора на 20–23 % с повышением его КПД на 0,5–1,5 %. Реализация нового способа векторного управления током в девятифазной обмотке генератора позволяет обеспечить близкий к единице коэффициент мощности генератора по первой и третьей гармоникам. Применение нового способа пространственно-векторной модуляции девятифазного напряжения позволяет применять управляющие воздействия в системе векторного управления током генератора для обеспечения его полигармонического режима работы. Практическую значимость подтверждают акты о практическом использовании результатов диссертации.

Экономическая значимость работы определяется тем, что полученные в ней теоретические результаты и разработанные практические рекомендации по выбору геометрических размеров магнитной системы и схемы обмотки СЭГ с ДЗО позволяют сократить затраты на их разработку и с минимальными экономическими затратами улучшить показатели удельной массы и КПД. Кроме того, реализация генераторов с улучшенными массогабаритными и энергетическими показателями позволяет получить наибольшую коммерческую выгоду.

Социальная значимость полученных результатов определяется возможностью использования разработанной системы электроснабжения в такие сферы жизни общества, как транспорт, робототехника и малая энергетика. Результаты диссертации находятся в области вопросов, недостаточно исследованных до настоящего времени. Этим определяется высокая значимость и важность аналитических и практических исследований, представленных в диссертации, для дальнейшего развития научного направления, а также внедрения их в учебный процесс.

Результаты диссертации могут быть применены на этапе проектирования автономных систем электроснабжения с минимальным потреблением из сети реактивной мощности для различных объектов. Результаты диссертации рекомендуется использовать на предприятиях, занимающихся разработкой и производством автономных комплексов электроснабжения, а также систем электропривода, робототехнических систем, беспилотных летательных аппаратов и транспорта.



### Опубликованность результатов диссертации в научной печати

Научные результаты, полученные автором в ходе диссертационного исследования, достаточно полно опубликованы в 19 научных работах, в том числе 9 статьях в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК Республики Беларусь, общим объемом 6 авторских листов. Опубликованные автором работы освещают весь объем исследований, результатов, выводов и в достаточной мере отражают полноту диссертации.

### Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК

Диссертация соответствует требованиям Инструкции о порядке оформления диссертации, диссертации в виде научного доклада, автореферата диссертации и публикаций по теме диссертации. Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации и отражает основные результаты, полученные в процессе ее выполнения.

### Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует

Оценка научно-технического уровня диссертации, значимости результатов теоретических и экспериментальных исследований, корректности применения методов исследования, математического аппарата, средств компьютерного моделирования позволяет сделать вывод о соответствии научной квалификации Пантелеева С.В. ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы (технические науки).

### Замечания по диссертации

*Более значимыми замечаниями являются:*

1. В главе 3 следовало бы более детально обосновать целесообразность выбора в качестве целевой функции минимума удельной массы генератора.
2. В модели активного выпрямителя напряжения принято допущение об идеальных ключах. Автору следовало бы провести оценку неидеальности силового преобразователя на качество процессов формирования напряжений.
3. Проведение расчетов и моделирования работы системы электроснабжения для установившегося режима работы является важным, но не достаточным критерием для выявления ее работоспособности. Автору следовало провести расчеты и моделирование работы системы так же и для переходного режима.

*Менее значимыми замечаниями, носящими по существу рекомендательный характер, являются:*

4. В главе 1 диссертации автор недостаточно полно осветил проблемы потребления реактивной мощности и качества генерируемой энергии, присущие автономным системам электроснабжения, решению которых, от части, и посвящена работа.

5. Выполняя анализ результатов имитационного моделирования системы «синхронный генератор – активный выпрямитель напряжения» необходимо было

оценить степень выполнения нормативных требований ГОСТ. Для этого требуется руководствоваться действующими ГОСТ.

### Заключение

Несмотря на отмеченные замечания, следует признать, что 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, в которой изложены результаты исследований, имеющие существенное научное и практическое значение для создания перспективных систем электроснабжения.

Диссертация отвечает требованиям, определенных в главе 3 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь.

Автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы (технические науки) за новые научные результаты, включающие:

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

– методику оптимального проектирования девятифазного СЭГ с ДЗО, отличающуюся высших гармоник ЭДС, индуцированных несинусоидальным распределением индукции магнитного поля, что позволяет уменьшить удельную генератора на 20–23 % по сравнению с трехфазным аналогом;

– способ векторного управления током в девятифазной обмотке генератора, отличающийся реализацией независимого управления пространственными гармоническими составляющими тока, что позволяет обеспечить передачу в нагрузку не менее 95 % мощности генератора в виде активной;

– способ пространственно-векторной модуляции напряжения девятифазного управляемого преобразователя электрической энергии, отличающийся независимой реализацией четырех гармоник напряжения на одном периоде модуляции, что в совокупности позволяет улучшить массогабаритные и энергетические параметры исследуемой системы «синхронный электрический генератор с девятифазной дробной зубцовой обмоткой – активный выпрямитель напряжения».

Официальный оппонент:

профессор кафедры естественно-научных и  
общепрофессиональных дисциплин

Белорусской государственной академии авиации  
кандидат технических наук, доцент



А.Г.Капустин

15.09.2023

