

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Объект авторского права

УДК 621.313

ПАНТЕЛЕЕВ
Станислав Владимирович

**УЛУЧШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И МАССОГАБАРИТНЫХ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИСТЕМЫ «СИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ
ГЕНЕРАТОР С ДЕВЯТИФАЗНОЙ ДРОБНОЙ ЗУБЦОВОЙ
ОБМОТКОЙ – АКТИВНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ»**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы

Минск, 2023

Научная работа выполнена в учреждении образования «Военная академия Республики Беларусь».

Научный руководитель **МАЛАШИН Андрей Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры электротехники и систем электропитания учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь»

Официальные оппоненты: **ДОБРЕГО Кирилл Викторович**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий ОНИЛ «Инновационная энергетика» Белорусского национального технического университета;

КАПУСТИН Александр Григорьевич, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры естественнонаучных и общепрофессиональных дисциплин учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации»

Опонирующая организация Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет».

Защита состоится 29 сентября 2023 года в 15.00 на заседании совета по защите диссертаций К 05.31.01 при учреждении образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (БГАТУ) по адресу: г. Минск, пр. Независимости, 99, корп. 1, ауд. 317.

Почтовый адрес: пр. Независимости, 99, корп. 1, Минск, 220012. Телефон ученого секретаря (+37517) 373-11-53; адрес электронной почты: ankrutau@yandex.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке БГАТУ.

Автореферат разослан 16 августа 2023 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций, кандидат технических наук, доцент



А.В. Крутов

ВВЕДЕНИЕ

Улучшение характеристик автономных систем электроснабжения (СЭС) непосредственно связано с совершенствованием электрических генераторов, в частности, их энергетических и массогабаритных параметров. Улучшение параметров электрических генераторов возможно достичь путем повышения эффективности процесса электромеханического преобразования энергии за счет реализации управления. Непосредственное управление этим процессом обуславливает переход от традиционных электрических генераторов, применяемых как самостоятельное устройство, к системам «электрический генератор – управляемый преобразователь электрической энергии (УПЭЭ)». Система управления преобразователем осуществляет регулирование коэффициента мощности в целях обеспечения передачи в нагрузку наибольшей части активной мощности электрического генератора.

Наиболее перспективными видами следует считать СЭС, разработанные на базе синхронных электрических машин с постоянными магнитами (СЭМ ПМ). Такие электрические машины имеют ряд достоинств: высокая надежность, простота конструкции, высокий КПД и коэффициент мощности по сравнению с другими классами электрических машин. Вместе с тем, в последнее десятилетие появилось значительное количество научных исследований синхронных электрических машин с дробными зубцовыми обмотками (СЭМ с ДЗО), которые имеют ряд достоинств, такие как: высокая удельная мощность и крутящий момент, простота конструкции. Однако электрические машины такого класса имеют нерешенные проблемы, которые ограничивают возможные области их применения в генераторном режиме работы. Основной проблемой является наличие широкого спектра высших гармоник индукции в магнитном поле возбуждения. При работе в генераторном режиме это обуславливает дополнительные потери, неэффективное использование объема магнитопровода, несинусоидальность индуцируемых в обмотках ЭДС. Поэтому решение задачи использования энергии высших гармоник индукции магнитного поля в процессе электромеханического преобразования энергии (реализация полигармонического режима работы) для улучшения энергетических и массогабаритных показателей генератора весьма актуально.

На основе проведенных исследований синхронных электрических генераторов с дробными зубцовыми обмотками (СЭГ с ДЗО) установлено, что такую задачу возможно решить при использовании многофазной обмотки и управлении током в ней. В связи с этим диссертация посвящена разработке способов управления током в многофазной обмотке генератора, а также методик электромагнитного расчета и параметрического синтеза СЭГ с ДЗО для реализации полигармонического режима работы генератора, улучшения его энергетических и массогабаритных показателей.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертации включена в план научной работы учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь». Содержание диссертационной работы соответствует приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 годы (постановление Совета Министров Республики Беларусь 12.03.2015 г. № 190, п. 1), а также приоритетным направлениям научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 годы (Указ Президента Республики Беларусь от 22.04.2015 г. № 166, п. 1.2 и 9.1).

Работа выполнялась в соответствии с научно-исследовательскими работами: «Электропривод поворота мачты и антенного поста базовой мобильной быстроразвертываемой платформы (МБРП-30-200) на базе многофазной магнитоэлектрической машины с дробными зубцовыми обмотками», «Обоснование тактико-технических требований для модернизации радиостанций Р-140-0,5 и Р-140-М», «Исследование возможности использования многофазной дробной зубцовой обмотки для повышения удельной мощности синхронных электрических машин».

Цель и задачи исследования

Цель исследования заключается в разработке принципов реализации полигармонического режима работы синхронного электрического генератора с многофазной дробной зубцовой обмоткой для улучшения его энергетических и массогабаритных показателей.

Задачи исследования:

1. Разработать математические модели для определения электродвижущих сил и индуктивных параметров многофазного ($m > 3$) синхронного электрического генератора с дробными зубцовыми обмотками.
2. Разработать методики электромагнитного расчета и параметрического синтеза многофазного синхронного электрического генератора с дробными зубцовыми обмотками, функционирующего в полигармоническом режиме.
3. Разработать способы векторного управления током в многофазной обмотке для обеспечения полигармонического режима работы синхронного электрического генератора.
4. Разработать имитационную модель совместного функционирования девятифазного синхронного электрического генератора и управляемого преобразователя электрической энергии.

Объект исследования: автономная система электроснабжения постоянного тока.

Предмет исследования: синхронный электрический генератор с многофазной дробной зубцовой обмоткой и управляемый преобразователь электрической энергии.

Научная новизна

1. Разработаны математические модели многофазных СЭГ с ДЗО, функционирующих в полигармоническом режиме, отличающиеся учетом переменной магнитной проводимости воздушного зазора, несинусоидальных законов изменения пространственных обмоточных функций и индукции магнитного поля в воздушном зазоре, позволяющие представить процесс электромеханического преобразования энергии генератора в виде многоканальной структуры.

2. Разработана методика параметрического синтеза многофазных СЭГ с ДЗО с использованием в качестве целевой функции минимума удельной массы электрического генератора, отличающаяся учетом в целевой функции высших гармоник ЭДС, индуцированных несинусоидальным распределением индукции магнитного поля за счет применения многофазной обмотки.

3. Разработан способ векторного управления током в девятифазной обмотке генератора посредством управляемого преобразователя электрической энергии, отличающийся независимым управлением пространственными гармоническими составляющими тока с использованием прогнозирующей модели, схемы инъекции высших гармоник и многоканальной структуры контура управления. Разработанный способ управления позволяет обеспечить формирование в каждой из фаз полигармонических токов, согласованных по форме и фазе с напряжением нагрузки электрического генератора.

4. Разработан способ пространственно-векторной модуляции напряжения девятифазного управляемого преобразователя электрической энергии, отличающийся отдельной и независимой реализацией каждой из пространственных гармонических составляющих напряжения на одном периоде пространственно-векторной модуляции, позволяющий обеспечить реализацию управляющих воздействий с постоянной частотой коммутации для системы регулирования тока в девятифазной обмотке электрического генератора, функционирующего в полигармоническом режиме.

Положения, выносимые на защиту

1. Математическая модель девятифазного СЭГ с ДЗО в полигармоническом режиме работы, отличающаяся учетом несинусоидальных законов изменения индукции магнитного поля в воздушном зазоре и пространственных обмоточных функций, позволяющая представить его структуру как объекта управления совокупностью параллельных энергетических каналов.

2. Методика параметрического синтеза девятифазного СЭГ с ДЗО, отличающаяся учетом в целевой функции «минимум удельной массы генератора» высших гармоник ЭДС, индуцированных несинусоидальным распределением индукции магнитного поля, позволяющая выполнить синтез генератора с минимальной удельной массой, значение которой на 20–23 % меньше, чем у трехфазного аналога.

3. Способ векторного управления током в девятифазной обмотке генератора, отличающийся реализацией независимого управления пространственными гармоническими составляющими тока посредством применения многоканальной структуры контура управления и схемы инъекции высших гармоник, позволяющий обеспечить формирование в каждой из фаз полигармонических токов, согласованных по форме и фазе с напряжением электрического генератора, за счет чего выполняется передача не менее 95 % активной мощности генератора в нагрузку.

Личный вклад соискателя

Основные результаты, приведенные в диссертации, получены автором самостоятельно. Основным соавтором публикаций является научный руководитель – кандидат технических наук, доцент А. Н. Малашин. Совместно с научным руководителем проводилась постановка цели и задач исследований, анализ и обобщение полученных результатов.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные результаты диссертации докладывались на: международных военно-научных конференциях Военной академии Республики Беларусь (г. Минск, 2017, 2019 гг.); XIII Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Иваново, 2018 г.); научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов Белорусского национального технического университета (г. Минск, 2017, 2018, 2020, 2021 гг.); II Международной научно-практической конференции учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации» (г. Минск, 2018 г.).

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты научных исследований по теме диссертации опубликованы в 9 статьях в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК Республики Беларусь, общим объемом 6 авторских листов, 2 статьях в других изданиях, 8 тезисах докладов и материалов конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня сокращений, введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений.

Общий объем диссертации составляет 256 страниц. В тексте диссертации расположены 27 таблиц и 107 рисунков. Список использованных источников на 15 страницах включает библиографический список из 147 наименований и список публикаций соискателя ученой степени из 19 наименований. Приложения представлены на 54 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе проведен анализ состояния и перспектив развития электрических генераторов для автономных СЭС. Отмечено, что СЭГ с ДЗО являются перспективными для применения в системах «электрический генератор – УПЭЭ», но имеют ряд нерешенных проблем, которые ограничивают возможные области их применения. Основной проблемой является наличие широкого спектра высших гармоник индукции в магнитном поле возбуждения.

Для использования энергии высших гармоник индукции магнитного поля в процессе электромеханического преобразования энергии в СЭГ с ДЗО, уменьшения его удельной массы и повышения КПД обоснована необходимость разработки девятифазных СЭГ с ДЗО с полигармонической ЭДС. При этом установлено, что число фаз, равное девяти, является минимальным необходимым для обеспечения максимума действующего значения полигармонических ЭДС и реализации независимого управления по первой и каждой из высших доминирующих гармоник тока. Это позволит раздельно компенсировать временные гармоники тока обратной последовательности фаз и выполнить регулирование коэффициентов мощности по первой и третьей гармоническим составляющим прямой последовательности в целях передачи в нагрузку наибольшей активной мощности генератора. При этом, максимизация рабочих гармоник ЭДС и тока

и уменьшение других высших гармоник в девятифазном СЭГ с ДЗО представляется возможным только комбинированным способом, сочетающим в себе оптимизацию конструктивных параметров генератора и реализацию управления. Выполнение таких процессов обеспечивает полигармонический режим электрического генератора.

Обобщение научной литературы показало, что в настоящее время отсутствуют методики электромагнитного расчета и параметрического синтеза многофазных СЭГ с ДЗО, разработанных с учетом их функционирования в полигармоническом режиме. В связи с этим разработка таких методик актуальна.

Установлено, что при работе девятифазного СЭГ с ДЗО в полигармоническом режиме на различные типы нагрузки не в полной мере обеспечивается передача активной мощности в нагрузку из-за рассогласованности во временной области напряжения и тока в обмотках. В связи с этим существует необходимость управления током в обмотках генератора посредством УПЭЭ. Увеличение числа фазных электромагнитных переменных и полигармонический режим работы девятифазного генератора обуславливают необходимость разработки нового способа регулирования тока с многоканальной структурой, который обеспечивает значение коэффициента мощности, близкое к единице.

Проведен анализ современных методов моделирования и исследования электрических машин.

Во второй главе выполняется разработка математической модели многофазного СЭГ с ДЗО, необходимой как для решения задач электромагнитного расчета и оптимизации генераторов, так и для использования в качестве прогнозирующей модели при разработке способов управления током в его обмотках.

В целях исследования ЭДС, индуцируемых в обмотках многофазного СЭГ с ДЗО, разработана аналитическая модель для расчета функции индукции магнитного поля в воздушном зазоре и модель многофазной дробной зубцовой обмотки. При этом, в отличие от существующих учтено, что:

- первичное распределение магнитного поля возбуждения существенно отличается от синусоидальной формы;
- структура электромагнитной системы генератора характеризуется односторонней зубчатостью;

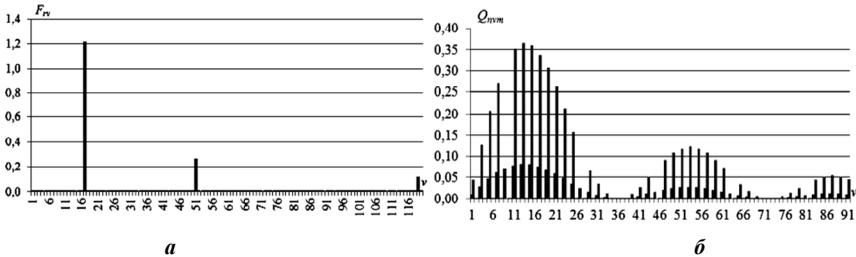
– обмотка статора имеет несинусоидальный характер распределения, что определяется посредством функции распределения обмотки и пространственной обмоточной функции (ПОФ).

Таким образом, ЭДС холостого хода в фазной обмотке определяется следующим образом:

$$e_n(t) = -\frac{d}{dt} \left[G_0 R_{\delta s} l_m \int_{\phi_s=0}^{2\pi} Q_n(\phi_s) F_r(\phi_s, t) M_s(\phi_s) d\phi_s \right], \quad (1)$$

где t – время; G_0 – постоянная магнитная проводимость эквивалентного равномерного воздушного зазора; $R_{\delta s}$ – радиус статора у воздушного зазора, l_m – эффективная длина статора; ϕ_s – угол по окружности воздушного зазора; $Q_n(\phi_s)$ – ПОФ; $F_r(\phi_s, t)$ – функция изменения МДС постоянных магнитов в воздушном зазоре; $M_s(\phi_s)$ – функция модуляции пазами статора.

В качестве примера на рисунке 1 представлены спектры пространственных гармоник функции распределения первичной МДС постоянных магнитов в воздушном зазоре и ПОФ девятифазного СЭГ с ДЗО (при количестве зубцов статора $z_1 = 36$ и пар полюсов ротора $p = 17$).



а – функция распределения первичной МДС постоянных магнитов в воздушном зазоре; **б** – ПОФ для одной фазы (черный) и девятифазной обмотки (серый)
Рисунок 1 – Спектры пространственных гармоник

В целях выявления типовых магнитных потоков рассеяния и дальнейшего учета их величины в математической модели для каждой области магнитной системы СЭГ с ДЗО построены двухмерные конечно-элементные модели магнитного поля (ДКЭМ МП). Анализ ДКЭМ МП позволил построить эквивалентную схему замещения магнитной цепи СЭГ с ДЗО и установить, что структура его магнитной системы обуславливает наличие повышенных

значений потоков краевого эффекта и рассеяния через вершину зубца, что непосредственно влияет на амплитуду и форму основного магнитного потока и ЭДС. Посредством эквивалентной схемы замещения магнитной цепи для типовых случаев относительного положения зубца статора и полюса ротора получены коэффициенты рассеяния и краевого эффекта (уточняющие коэффициенты). Учет таких коэффициентов в аналитической модели для расчета функции ЭДС позволило повысить ее точность.

В целях исследования влияния схемы и параметров обмотки на индуктивные параметры электрического генератора разработана аналитическая модель для расчета индуктивностей многофазного СЭГ с ДЗО:

$$[L] = (1 + \sigma_{\delta})[L_a] + [L_{\sigma s}]; \quad (2)$$

$$[L_a] = C_a [W]^T [W]; \quad (3)$$

$$[L_{\sigma s}] = C_{\sigma s} [D]^T [D]; \quad (4)$$

$$\sigma_{\delta} = \sum_{\substack{v=1, \\ v \neq p, 3p}}^{\infty} \left(\frac{k_{wv}}{v} \right)^2 \bigg/ \sum_{v=1,3} \left(\frac{k_{w(v'p)}}{v'p} \right)^2, \quad (5)$$

где $[L]$ – матрица индуктивностей обмотки статора; σ_{δ} – коэффициент дифференциального рассеяния; $[L_a]$ – матрица собственных и взаимных индуктивностей; $[L_{\sigma s}]$ – матрица индуктивности пазового рассеяния; C_a – коэффициент конструктивных параметров СЭГ с ДЗО; $[W]$ – матрица ПОФ; $C_{\sigma s}$ – коэффициент конструктивных параметров паза статора; $[D]$ – матрица функции распределения обмотки; k_{wv} – обмоточный коэффициент; v – номер пространственной гармонической составляющей; v' – порядок пространственной гармонической составляющей; p – число пар полюсов СЭГ с ДЗО.

Модель (2)–(5) позволяет учесть несинусоидальность закона изменения ПОФ, и как следствие – высшие пространственные гармоники магнитного поля в воздушном зазоре. Установлено, что матрица собственных и взаимных индуктивностей фазных обмоток электрического генератора обусловлена составом матрицы ПОФ и матрицы функции распределения обмотки, а также значением коэффициента дифференциального рассеяния энергии магнитного поля нерабочих гармоник СЭГ с ДЗО, функционирующего в полигармоническом режиме.

С использованием полученных выражений для расчета ЭДС (1) и индуктивностей (2) математическая модель девятифазного СЭГ с ДЗО на основе уравнений Кирхгофа в матричной форме при активном характере нагрузки имеет следующий вид:

$$[i][R_w] + [i][R_l] + [L] \frac{d[i]}{dt} + [i] \frac{d[L]}{dt} + [e] = 0, \quad (6)$$

где $[i] = [i_1 \ i_2 \ \dots \ i_m]^T$ – матрица-столбец мгновенных фазных токов; $[R_w] = \text{diag}[R_{w1} \ R_{w2} \ \dots \ R_{wm}]$ – диагональная матрица активных сопротивлений фазных обмоток; $[R_l] = \text{diag}[R_{l1} \ R_{l2} \ \dots \ R_{lm}]$ – диагональная матрица активных сопротивлений нагрузки; $[e] = [e_1 \ e_2 \ \dots \ e_m]^T$ – матрица-столбец мгновенных значений фазных ЭДС холостого хода.

Выражение (6) применяется при электромагнитном расчете на начальных этапах решения задач оптимизации многофазных СЭГ с ДЗО, а также составляет основу прогнозирующей модели при разработке системы управления током в обмотках генератора. При этом, учет значений взаимных индуктивностей между фазными обмотками статора при реализации системы управления затруднен. Для приведения полной матрицы индуктивностей (2) к диагональному виду применяется метод преобразования к двухфазным ортогональным системам координат, которое осуществляется для всех компонентов выражения (6) при условии инвариантности мощности в исходных и преобразованных системах координат.

Установлено, что в случае девяти фаз необходимо учитывать компонент нулевой последовательности и четыре результирующих пространственных вектора, эквивалентных двухфазным фиктивным электрическим машинам, как показано на рисунке 2. Каждая фиктивная электрическая машина является независимой и характеризуется своими параметрами ЭДС, сопротивлением, индуктивностью и семейством нечетных гармоник.

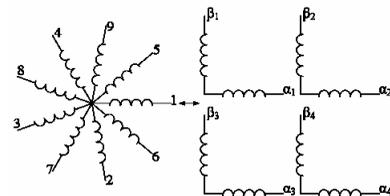
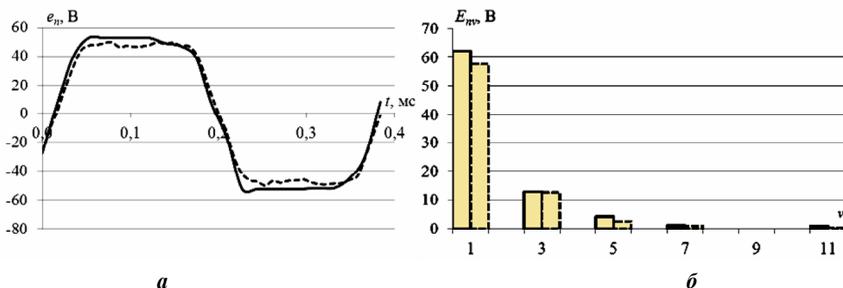


Рисунок 2 – Эквивалентное соответствие 9-фазной электрической машины четырем 2-фазным электрическим машинам

Для уточнения номинальных параметров на завершающих этапах оптимизации разработана математическая модель девятифазного СЭГ с ДЗО на основе уравнений Кирхгофа и Пуассона для векторного магнитного

потенциала. Модель дополнительно учитывает нелинейность функции намагничивания ферромагнитных материалов.

В результате математического моделирования установлено, что использование в синхронном генераторе девятифазной дробной зубцовой обмотки позволяет использовать энергию высших гармоник индукции магнитного поля в процессе электромеханического преобразования энергии в целях индуцирования с наибольшей эффективностью гармонических составляющих ЭДС первого и третьего порядка, как показано на рисунке 3 (сплошная – аналитический метод, пунктир – численный метод конечных элементов). Это обуславливает уменьшение коэффициента дифференциального рассеяния с одновременным повышением действующего значения линейной ЭДС по сравнению с трехфазным аналогом. Поэтому целесообразно рассмотреть возможность решения задачи реализации полигармонического режима работы СЭГ с ДЗО за счет использования девятифазной обмотки.



a – осциллограмма; *б* – спектр временных гармоник функции

Рисунок 3 – Функция ЭДС холостого хода в фазе *n* обмотки статора СЭГ с ДЗО

Анализ результатов математического моделирования показал, что функции изменения собственной и взаимной индуктивности фазы не зависят от угла поворота ротора СЭГ с ДЗО. Выявлены свойства малой индуктивной связи фаз обмотки статора. Взаимная индуктивность для исследуемого примера СЭГ с ДЗО составляет 6,6 % от собственной индуктивности.

В **третьей главе** получены новые закономерности для девятифазных СЭГ с ДЗО при полигармоническом режиме работы:

- изменение коэффициента искажения формы индукции магнитного поля возбуждения от геометрических параметров магнитной системы;
- изменение обмоточного коэффициента и коэффициента дифференциального рассеяния от количества зубцов статора и полюсов ротора.

Для нахождения оптимальных параметров магнитной системы и параметров обмотки разработана методика параметрического синтеза девятифазного СЭГ с ДЗО, алгоритм которой представлена на рисунке 4.

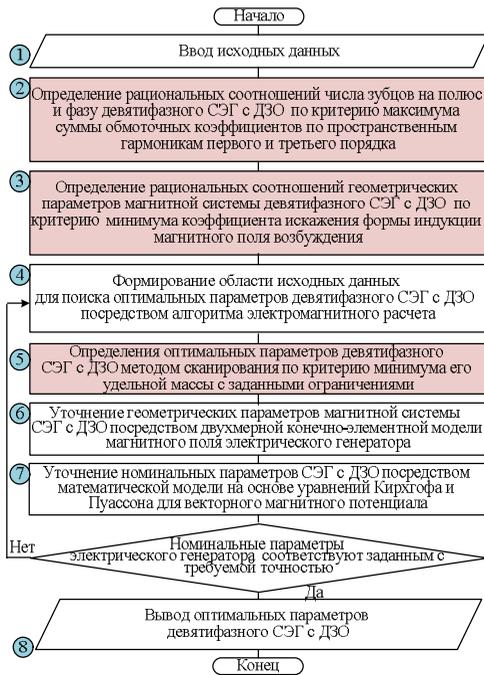


Рисунок 4 – Блок-схема обобщенного алгоритма методики параметрического синтеза девятифазного СЭГ с ДЗО

Отличием методики является использование векторного критерия оптимальности, компоненты которого (максимум суммы обмоточных коэффициентов по пространственным гармоникам первого и третьего порядка, минимум коэффициента искажения формы индукции магнитного поля возбуждения, минимум удельной массы) определяют полигармонический режим работы генератора. Путем последовательного решения оптимизационной задачи для каждого компонента вектора с принятием дополнительных ограничений на следующем этапе, векторный критерий сводится к скалярному – минимум удельной массы электрического генератора.

Ниже кратко рассмотрены этапы методики параметрического синтеза девятифазного СЭГ с ДЗО. На 1-м и 2-м этапах с учетом исходных данных в целях увеличения действующего значения полигармонической ЭДС определяются рациональные соотношения чисел зубцов на полюс и фазу ($q = z_1 / 2pt$) девятифазного генератора по критерию (7) максимума суммы обмоточных коэффициентов по пространственным гармоникам первого и третьего порядка ($v' = 1, 3$) с учетом заданного ограничения коэффициента дифференциального рассеяния.

$$k_w = \sum_{v=p,3p} (k_{wv} / v') \rightarrow \max, \quad \sigma_\delta \leq 0,1. \quad (7)$$

Для этого используется математическая модель обмотки. Результаты расчета для примера девятифазного СЭГ с ДЗО представлены на рисунке 5.

На 3-м этапе методики в целях обеспечения максимальной доли гармоник первого и третьего порядка (B_{rv} при $v = p, 3p$) и уменьшения доли высших гармоник индукции в магнитном поле возбуждения (B_{rv} при $v \neq p, 3p$) определяются рациональные соотношения геометрических параметров магнитной системы девятифазного СЭГ с ДЗО по критерию (8) минимума коэффициента искажения формы индукции магнитного поля возбуждения.

$$k_{isk} = \sqrt{\frac{\sum_{\substack{v=1, \\ v \neq p, 3p}}^{200} B_{rv}^2}{\sum_{v=p, 3p} B_{rv}^2}} \rightarrow \min. \quad (8)$$

Расчет коэффициента искажения выполняется на интервале изменения геометрических параметров магнитной системы СЭГ с ДЗО (относительное открытие пазов статора b_{cs}/τ_s , величина полюсного перекрытия b_{pm}/τ_r) посредством разработанной аналитической модели для определения функции индукции магнитного поля возбуждения в воздушном зазоре. Установлено, что функция изменения коэффициента искажения от величины полюсного перекрытия является унимодальной, как показано на рисунке 6.

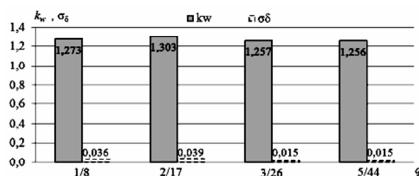


Рисунок 5 – Результаты анализа обмоточных коэффициентов k_w и коэффициентов дифференциального рассеяния σ_δ СЭГ с ДЗО

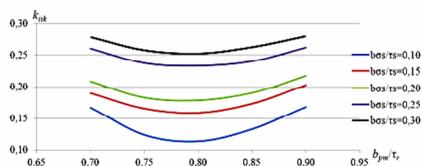


Рисунок 6 – Функция коэффициента искажения формы индукции магнитного поля возбуждения k_{isk} на интервале изменения геометрических параметров магнитной системы СЭГ с ДЗО

На 4-м этапе посредством разработанной методики электромагнитного расчета многофазных СЭГ с ДЗО формируется область исходных данных для решения задачи параметрического синтеза. Используя методику электромагнитного расчета, проведен анализ чувствительности критерия оптимизации «удельная масса» к изменению параметров электромагнитной системы девятифазного СЭГ с ДЗО, функционирующего в полигармоническом режиме, при неизменных электромагнитных условиях. В результате такого анализа установлено, что:

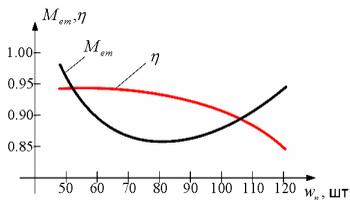
– при девятифазном исполнении генератора достигается меньшая удельная масса во всем диапазоне активной мощности по сравнению с трехфазным аналогом;

– между количеством витков обмотки статора и высотой постоянного магнита существует оптимальное соотношение, при котором удельная масса электрического генератора достигает минимального значения;

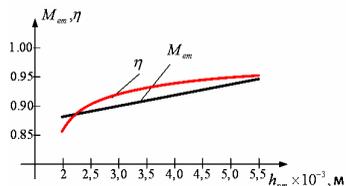
– функция изменения удельной массы от количества витков обмотки статора и высоты постоянного магнита исследуемого генератора является унимодальной, как показано на рисунке 7. Поэтому минимум удельной массы целесообразно достигать путем поиска оптимальных параметров электромагнитной системы посредством одного из прямых методов оптимизации – метода сканирования с ограничениями.

На 5-м этапе согласно алгоритму метода сканирования по критерию оптимальности «минимум удельной массы»

$m_{em}(h_{pm}, w_n) / P_a(h_{pm}, w_n) \rightarrow \min$ с заданными ограничениями значений активной мощности $P_{a.ref1} \leq P_a(h_{pm}, w_n) \leq P_{a.ref2}$; номинального фазного напряжения $U_{n.ref1} \leq U_n(h_{pm}, w_n) \leq U_{n.ref2}$; амплитуды магнитной индукции в зубце, ярме статора и ярме ротора, соответственно $B_z(h_{pm}) \leq B_{z,max}$, $B_{ys}(h_{pm}) \leq B_{ys,max}$, $B_{yr}(h_{pm}) \leq B_{yr,max}$; объема постоянного магнита $V_{pm}(h_{pm}) \geq V_{pm.ref}$; тока короткого замыкания $3 \leq I_{n,shc}(h_{pm}, w_n) / I_n \leq 4$; плотности тока в обмотках статора $J(w_n) \leq J_{ref}$; магнитной индукции рабочей точки постоянного магнита в режиме короткого замыкания и номинальном режиме работы СЭГ с ДЗО, соответственно $B_{shc.ref1} \leq B_{shc}(h_{pm}, w_n) \leq B_{shc.ref2}$, $B_{m0.ref1} \leq B_{m0}(h_{pm}) \leq B_{m0.ref2}$ осуществляется поиск значений переменных (высота постоянного магнита, число витков фазы), которые являются оптимальным решением.



а



б

$$a - h_{pm} = const ; b - w_n = const$$

Рисунок 7 – График функции изменения удельной массы M_{em} и КПД η от числа витков в фазе w_n и высоты постоянного магнита h_{pm}

На 6-м и 7-м этапах в целях лучшего использования электротехнической стали магнитопровода посредством ДКЭМ МП выявляются наиболее насыщенные участки и участки, характеризующиеся низкими значениями напряженности магнитного поля для уточнения геометрических параметров магнитной системы СЭГ с ДЗО. Посредством математической модели на основе уравнений Кирхгофа и Пуассона для векторного магнитного потенциала уточняются номинальные параметры генератора.

Применение разработанной методики параметрического синтеза для девятифазных СЭГ с ДЗО обеспечивает уменьшение их удельной массы на 20–23 % с повышением КПД на 0,5–1,5 % относительно трехфазных аналогов в мощностном диапазоне 0,5 – 6,5 кВт.

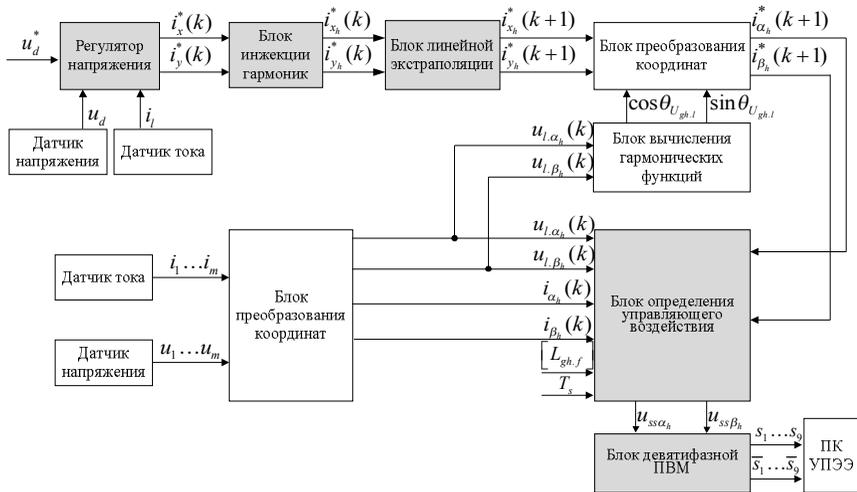
В четвертой главе разработана имитационная модель системы «девятифазный СЭГ с ДЗО – УПЭЭ», в которой реализован новый способ векторного управления с пространственно-векторной модуляцией (ПВМ) для многофазных систем при полигармоническом режиме работы.

Способ векторного управления током в девятифазной обмотке генератора посредством УПЭЭ отличается независимым управлением пространственными гармоническими составляющими тока с использованием прогнозирующей модели и схемы инъекции высших гармоник. Основой прогнозирующей модели являются математические модели девятифазного СЭГ с ДЗО и УПЭЭ (9) в неподвижных декартовых системах координат $\alpha_h \beta_h$, посредством которых определяется управляющее воздействие в виде векторов напряжения полупроводникового коммутатора (ПК), позволяющих компенсировать отклонение вектора тока в обмотке электрического генератора.

$$\bar{u}_{gh.ss}(k) = \bar{u}_{gh.l}(k) - \frac{[L_{gh.f}]}{T_s} [\bar{i}_{gh}^*(k+1) - \bar{i}_{gh}(k)], \quad (9)$$

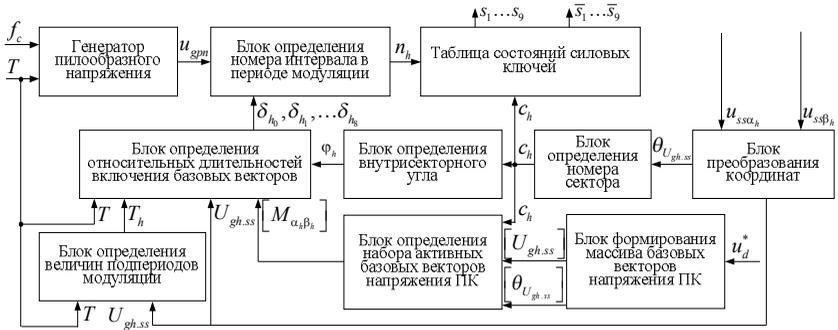
где $\bar{u}_{gh.ss}(k)$ – векторы напряжений ПК; $\bar{u}_{gh.l}(k)$, $\bar{i}_{gh}(k)$ – векторы напряжений и токов нагрузки генератора; $\bar{i}_{gh}^*(k+1)$ – заданные векторы токов генератора в начале следующего периода дискретизации; $[L_{gh.f}]$ – матрица индуктивности буферных реакторов (компоненты которых определены с учетом индуктивности обмотки статора генератора); T_s – период дискретизации.

Функциональная схема контура управления УПЭЭ представлена на рисунке 8.



u_d^* и u_d – заданная и фактическая величина напряжения постоянного тока;
 i_l – величина постоянного тока в нагрузке; k – текущий период дискретизации;
 $(k + 1)$ – следующий период дискретизации; $u_1 \dots u_m$ и $i_1 \dots i_m$ – мгновенные значения фазных напряжений и токов нагрузки генератора; u_{l,α_h} , u_{l,β_h} и i_{α_h} , i_{β_h} – проекции векторов напряжения $\bar{u}_{gh,l}$ и тока нагрузки \bar{i}_{gh} на неподвижные ортогональные оси систем координат $\alpha_h\beta_h$ (далее – на оси $\alpha_h\beta_h$); i_x^* и i_y^* – заданные величины «активной» и «реактивной» составляющей вектора тока; $i_{x_h}^*$ и $i_{y_h}^*$ – заданные величины «активной» и «реактивной» составляющей h -го вектора тока; $i_{\alpha_h}^*$, $i_{\beta_h}^*$ – заданные величины проекций h -го вектора тока на оси $\alpha_h\beta_h$; $\cos\theta_{U_{gh,l}}$ и $\sin\theta_{U_{gh,l}}$ – гармонические функции векторов напряжения нагрузки генератора $\bar{u}_{gh,l}$; u_{ss,α_h} , u_{ss,β_h} – величины проекций h -го вектора напряжения ПК $\bar{u}_{gh,ss}$ на оси $\alpha_h\beta_h$; $s_1 \dots s_9$, $\bar{s}_1 \dots \bar{s}_9$ – дискретные коммутационные переменные
 Рисунок 8 – Функциональная схема контура управления УПЭЭ

Для реализации управляющих воздействий с постоянной частотой коммутации разработан алгоритм девятифазной ПВМ, отличающийся отдельной и независимой реализацией четырех пространственных гармонических составляющих напряжения ПК на одном периоде модуляции. В обобщенном виде его функциональная схема имеет вид, представленный на рисунке 9.



T – период модуляции; T_h – длительность h -ой части периода модуляции;
 $\delta_{h_0}, \delta_{h_1}, \dots, \delta_{h_8}$ – относительная длительность включения нулевых и ненулевых базовых векторов на h -ой части периода модуляции; u_{gm} – сигнал пилообразного напряжения с единичной амплитудой и частотой $f_c = 1/T$; n_h – номер интервала в периоде модуляции; $U_{gh.ss}$ – модуль h -ого заданного вектора напряжения ПК; $\theta_{U_{gh.ss}}$ – угол h -ого заданного вектора напряжения ПК; $[U_{gh.ss}]$ – массив модулей базовых векторов напряжения ПК; $[\theta_{U_{gh.ss}}]$ – массив углов базовых векторов напряжения ПК; $[M_{\alpha,\beta}]$ – матрица коэффициентов; ϕ_h – внутрисекторный угол h -ого заданного вектора напряжения ПК; c_h – номер сектора, соответствующий h -му заданному вектору напряжения ПК

Рисунок 9 – Функциональная схема блока девятифазной ПВМ

Согласно функциональной схеме для реализации управляющих воздействий необходимо предварительно исследовать схему ПК, поставив в соответствие каждому возможному состоянию ключей определенный базовый вектор напряжения. Далее путем координатных преобразований временным гармоникам напряжения ПК ставятся в соответствие пространственные гармонические составляющие. На следующих этапах выполняется: определение набора активных базовых векторов напряжения; разделение периода модуляции на части, количество которых находится в прямой связи с числом пространственных гармонических составляющих, а продолжительность является функцией модулей заданных векторов напряжения ПК; определение последовательности и длительности реализации активных базовых векторов напряжения в пределах каждой части периода модуляции; реализация в каждой части периода модуляции заданного вектора напряжения ПК для одной из пространственных

гармоник с одновременным аннулированием векторов напряжения для остальных пространственных гармоник.

Разработанная имитационная модель позволяет проводить численные эксперименты с системой «деятифазный СЭГ с ДЗО – УПЭЭ», что обеспечивает сокращение сроков разработки автономных СЭС. Основные результаты имитационного моделирования представлены на рисунке 10.

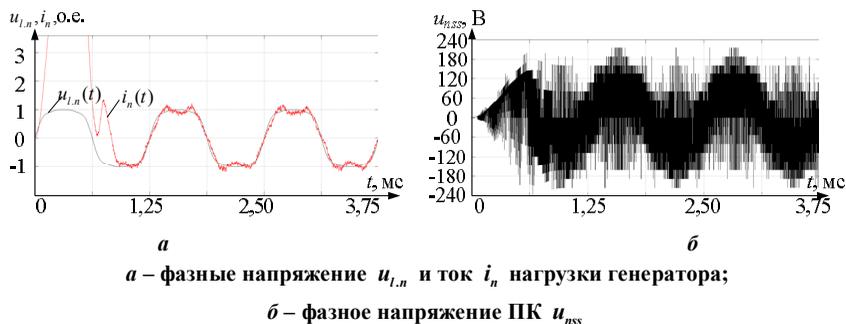
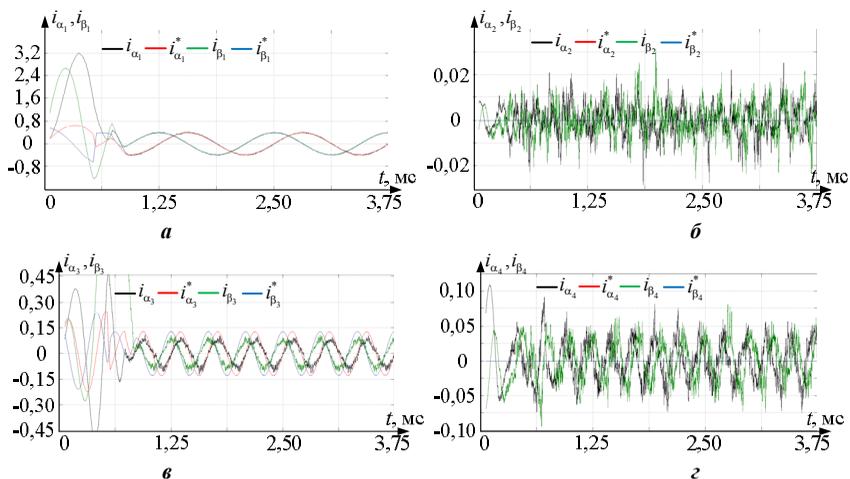


Рисунок 10 – Осциллограммы сигналов в звене переменного тока системы «деятифазный СЭГ с ДЗО – УПЭЭ»

Из рисунка 10а видно, что разработанный способ векторного управления током в деятифазной обмотке генератора позволяет выполнить регулирование коэффициента мощности по первой и третьей гармоническим составляющим напряжения СЭГ с ДЗО. Полигармонический ток в фазах генератора формируется посредством управляющих воздействий в виде напряжения ПК (см. рисунок 10б), которое реализовано в соответствии с алгоритмом ПВМ.

Результаты математического моделирования показали, что в исследуемой системе «деятифазный СЭГ с ДЗО – УПЭЭ» обеспечивается передача не менее 95 % активной мощности генератора в нагрузку.

На рисунке 11 поясняется способ многоканального и независимого векторного управления током в четырех фиктивных двухфазных электрических генераторах (см. рисунок 2), реализованного с использованием прогнозирующей модели и схемы инъекции гармоник.



***a* – в $\alpha_1\beta_1$ плоскости; *б* – в $\alpha_2\beta_2$ плоскости;
в – в $\alpha_3\beta_3$ плоскости; *г* – в $\alpha_4\beta_4$ плоскости**

Рисунок 11 – Осциллограммы заданных $i_{\alpha_n}^*$, $i_{\beta_n}^*$ и текущих i_{α_n} , i_{β_n} проекций пространственных векторов тока на оси $\alpha_n\beta_n$ систем координат в девятифазном СЭГ с ДЗО

Анализ результатов имитационного моделирования работы системы «девятифазный СЭГ с ДЗО – УПЭЭ» показал, что применение в СЭГ с ДЗО девятифазной обмотки и реализация векторного управления током в ней позволяют решить задачу использования энергии высших гармоник индукции магнитного поля в процессе электромеханического преобразования энергии (реализация полигармонического режима работы).

Проведены экспериментальные исследования макета девятифазного СЭГ с ДЗО. В результате экспериментальных исследований подтверждена достоверность разработанных математических моделей, правильность и реализуемость разработанной методики параметрического синтеза девятифазного СЭГ с ДЗО, функционирующего в полигармоническом режиме. Относительная погрешность измерений и расчетов ЭДС, индуктивных параметров и внешней характеристики генератора составляет не более 9,7 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана аналитическая модель для расчета индуктивных параметров СЭГ с ДЗО, отличающаяся учетом высших пространственных гармоник магнитного поля в воздушном зазоре и несинусоидального закона изменения ПОФ. Разработанная модель позволяет с высокой точностью при наименьших временных затратах определить индуктивности девятифазного СЭГ с ДЗО, которые имеют непосредственное влияние на точность расчета управляющих воздействий в контуре управления током в обмотках генератора и на выбор номинала индуктивности буферного реактора УПЭЭ [1; 7; 11; 18].

2. Усовершенствована аналитическая модель для расчета функций ЭДС, индуцируемых в многофазной обмотке СЭГ с ДЗО, отличающаяся учетом несинусоидальных законов изменения индукции магнитного поля возбуждения и ПОФ, а также переменной магнитной проводимости воздушного зазора электрического генератора. Модель позволяет с высокой точностью определить степень влияния геометрических параметров магнитной цепи и схемы обмотки на характер изменения функций ЭДС в девятифазном СЭГ с ДЗО [7; 8; 9; 14].

3. Разработаны математические модели девятифазного СЭГ с ДЗО, отличающиеся учетом перераспределения электромагнитной энергии по отдельным пространственным гармоническим составляющим из-за увеличенного числа фазных электромагнитных переменных и полигармонического режима работы генератора. Математические модели позволяют представить процесс электромеханического преобразования энергии генератора в виде многоканальной структуры. Математические модели используются в процессе оптимизации девятифазного СЭГ с ДЗО для количественного определения значений напряжений, токов и мощности с высокой степенью точности.

В результате экспериментальных исследований разработанного макета девятифазного СЭГ с ДЗО подтверждена высокая степень достоверности разработанных математических моделей. Сравнение экспериментальных и расчетных результатов показало, что их относительная погрешность составляет не более 9,7 % [7; 8; 10; 11; 14].

4. Разработана методика параметрического синтеза девятифазного СЭГ с ДЗО с использованием целевой функции минимума его удельной массы.

Отличительной особенностью методики является реализация высших гармоник ЭДС и тока в многофазной обмотке в качестве рабочих. Основу методики параметрического синтеза составляет усовершенствованная модель оптимизации (алгоритм электромагнитного расчета СЭГ с ДЗО), позволяющая выполнить анализ чувствительности критерия оптимизации электрического генератора к изменению геометрических параметров магнитной системы и параметров обмотки статора. Реализация разработанной методики позволяет выполнить синтез девятифазного СЭГ с ДЗО с минимальной удельной массой (на 20–23 % меньше трехфазного аналога) с повышением КПД на 0,5–1,5 % [1; 7; 8; 11; 12; 15; 16].

5. Разработан способ векторного управления током в девятифазной обмотке генератора посредством УПЭЭ, отличающийся независимым управлением пространственными гармоническими составляющими тока с использованием прогнозирующей модели, схемы инъекции высших гармоник и алгоритма ПВМ. Разработанный способ управления позволяет сформировать в фазах обмотки генератора полигармонические токи, согласованные по форме и фазе с напряжением нагрузки электрического генератора, для обеспечения передачи не менее 95 % его активной мощности в нагрузку [2; 3; 4; 5; 6; 13; 17].

6. Разработана имитационная модель функционирования системы «девятифазный СЭГ с ДЗО – УПЭЭ», отличающаяся многоканальной структурой контура управления, 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. Разработанная имитационная модель позволяет проводить численные эксперименты с системой «СЭГ с ДЗО – УПЭЭ», что обеспечивает сокращение сроков разработки автономных систем электроснабжения на базе девятифазных СЭГ с ДЗО [4; 6; 10; 16; 19].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты диссертационной работы использованы: при разработке технического облика перспективных базовых мобильных быстроразвертываемых платформ в ОАО «ВОЛАТАВТО», в учебном процессе кафедры электротехники и систем электропитания УО «Военная академия Республики Беларусь», что подтверждается актами о

практическом использовании результатов диссертационного исследования, выданными соответствующими организациями.

Полученные результаты диссертационного исследования также могут быть рекомендованы для использования и реализации в проектных, научно-исследовательских, опытно-конструкторских и других организациях, осуществляющих исследование, разработку и проектирование синхронных электрических машин или управляемых преобразователей электрической энергии.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в изданиях, включенных в перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований

1. Пантелеев, С. В. Повышение энергетических показателей электрической машины путем применения многофазной зубцовой обмотки / С. В. Пантелеев, А. Н. Малашин // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2017. – № 3. – С. 80–86.

2. Синтез алгоритма векторной широтно-импульсной модуляции в девятифазном активном выпрямителе напряжения / С. В. Пантелеев, А. Н. Малашин, Ю. В. Суходолов, Д. В. Каркоцкий // Изв. вузов. и энергет. об-ний СНГ. Энергетика. – 2018. – Т. 61, № 4. – С. 334–345.

3. Пантелеев, С. В. Моделирование m -фазного активного выпрямителя напряжения с пространственно-векторной модуляцией / С. В. Пантелеев, А. Н. Малашин // Вестн. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 4. – С. 455–468.

4. Пантелеев, С. В. Разработка математической модели многофазного управляемого преобразователя электрической энергии с системой векторного управления. Часть 1 / С. В. Пантелеев, А. Н. Малашин // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та. – 2020. – № 2. – С. 82–90.

5. Пантелеев, С. В. Разработка системы векторного управления полупроводникового преобразователя, обеспечивающей полигармонический режим работы многофазной электрической машины / С. В. Пантелеев, А. Н. Малашин, А. Е. Калета // Вестн. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, № 3. – С. 331–339.

6. Пантелеев С. В. Разработка системы релейно-векторного управления для многофазного управляемого преобразователя электрической энергии / С. В. Пантелеев, А. Н. Малашин // Системный анализ и прикладная информатика. – 2020. – № 4. – С. 5–15.

7. Пантелеев, С. В. Анализ особенностей магнитного поля синхронного электрического генератора с многофазной дробной зубцовой обмоткой в полигармоническом режиме работы / С. В. Пантелеев, А. Н. Малашин // Вестн. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2021. – Т. 66, № 3. – С. 343–355.

8. Пантелеев, С. В. Разработка аналитической модели для определения основного магнитного потока через катушку рабочей обмотки синхронной электрической машины с дробной зубцовой обмоткой / С. В. Пантелеев, А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин // Вестн. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2022. – Т. 67, № 1. – С. 75–85.

9. Менжинский, А. Б. Разработка аналитической модели для определения магнитного потока рассеяния через зубцы статора синхронной

электрической машины с дробной зубцовой обмоткой / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин, С. В. Пантелеев // Изв. вузов. и энергет. об-ний СНГ. Энергетика. – 2022. – № 3. – С. 224–239.

Статьи в других изданиях

10. Пантелеев, С. В. Математическая модель многофазного магнитоэлектрического генератора с дробными зубцовыми обмотками / С. В. Пантелеев, А. Н. Малашин // Магистерский вестник : сб. науч. работ магистрантов и аспирантов / Ин-т подгот. науч. кадров НАН Беларуси ; редкол.: И. И. Ганчеренок (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 51–58.

11. Пантелеев, С. В. Разработка способа определения индуктивных параметров синхронного электрического генератора с многофазной дробной зубцовой обмоткой / С. В. Пантелеев, А. Н. Малашин // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та. – 2021. – № 2. – С. 108–122.

Материалы конференций и тезисы докладов

12. Пантелеев, С. В. Методика построения и особенности устройства девятифазного зубцовой обмотки магнитоэлектрического генератора / С. В. Пантелеев, А. Н. Малашин // Обеспечение военной безопасности государства: проблемы и перспективы : тез. докл. Междунар. воен.-науч. конф. учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь», Минск, 23–24 марта 2017 г. / Воен. акад. Респ. Беларусь. – Минск, 2017. – С. 427.

13. Пантелеев, С. В. Алгоритм управления многофазным преобразователем электрической энергии, обеспечивающий работу в условиях несинусоидальной ЭДС / С. В. Пантелеев, А. Н. Малашин, С. В. Сизиков // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 15-й Международной научно-технической конференции. – Минск : БНТУ, 2017. – Т. 1. – С. 19.

14. Пантелеев, С. В. Математическая модель многофазного магнитоэлектрического генератора с дробными зубцовыми обмотками / С. В. Пантелеев, А. Н. Малашин // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 16-й Международной научно-технической конференции. – Минск : БНТУ, 2018. – Т. 1. – С. 24.

15. Пантелеев, С. В. Оптимальная структура зубцово-пазовой зоны m -фазной магнитоэлектрической машины с дробной зубцовой обмоткой / С. В. Пантелеев, А. Н. Малашин // Электроэнергетика. Энергия – 2018 : Тринадцатая междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых : материалы конф., Иваново, 3–5 апр. 2018 г. : [в 6 т.] / Иван. гос. энергет. ун-т. – Иваново, 2018. – Т. 3. – С. 43.

16. Пантелеев, С. В. Технический облик системы электроснабжения беспилотного летательного аппарата на базе m -фазного магнитоэлектрического генератора с дробными зубцовыми обмотками /

С. В. Пантелеев, А. Н. Малашин, Ю. Г. Коваль// Актуальные проблемы и перспективы развития авиации : сб. материалов II междунар. науч.-практ. конф., учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Минск, 25–26 апр. 2018 г. : в 2 ч. / Белорусская государственная академия авиации ; сост.: А. В. Дубовский [и др.]. – Минск, 2018. – Ч. 2. – С. 68–69.

17. Пантелеев, С. В. Прогнозирующее управление m -фазным активным выпрямителем напряжения с использованием пространственно-векторной модуляции / С. В. Пантелеев, А. Н. Малашин // Обеспечение военной безопасности государства: проблемы и перспективы : тез. докл. Междунар. воен.-науч. конф. учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь», Минск, – 17–18 апреля 2019 г. / Воен. акад. Респ. Беларусь. – Минск, 2019. – С. 132.

18. Пантелеев, С. В. Разработка способа определения индуктивных параметров электрической машины с многофазной дробной зубцовой обмоткой / С. В. Пантелеев, А. Н. Малашин, А. А. Степанов // Энергетика Беларуси-2020 [Электронный ресурс] : сборник научных работ Республиканской научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов ЭФ БНТУ (проводится в рамках 72-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов БНТУ), 10 ноября 2020 г. / редкол.: Е. Г. Пономаренко, Н. В. Шведко. – Минск : БНТУ, 2021. – С. 95–97.

19. Пантелеев, С. В. Способ векторного управления полупроводниковым преобразователем для обеспечения полигармонического режима работы многофазной электрической машины / С. В. Пантелеев, А. Н. Малашин, С. В. Сизиков // Энергетика Беларуси-2021 [Электронный ресурс] : материалы Республиканской научно-практической конференции, 26 мая 2021 г. / сост. И. Н. Прокопеня. – Минск : БНТУ, 2021. – С. 136–141.

РЭЗІЮМЭ

Панцялееў Станіслаў Уладзіміравіч

Паляпшэнне энергетычных і масагабарытных паказчыкаў сістэмы «сінхронны электрычны генератар з дзевяціфазнай дробавай зубцовай абмоткай – актыўны прыбор напругі»

сінхронны электрычны генератар, шматфазная абмотка, дробавая зубцовая абмотка, матэматычная мадэль, метадка параметрычнага сінтэзу, полігарманічны рэжым, вектарнае кіраванне

Мэта дысертацыі працы складаецца ў распрацоўцы прынцыпаў рэалізацыі полігарманічнага рэжыму працы сінхроннага электрычнага генератара са шматфазнай дробавай зубцовай абмоткай для паляпшэння яго энергетычных і масагабарытных паказчыкаў.

Метады даследавання: метады тэорыі магнітных ланцугоў і палі, а таксама метады матэматычнага мадэлявання электрычных машын.

Атрыманя вынікі і іх навізна. Распрацавана метадка параметрычнага сінтэзу сінхронных генератараў з дробавымі зубцовымі абмоткамі (СГ з ДЗА) пры рэалізацыі вышэйшых гармонік ЭРС і току ў шматфазнай абмотцы ў якасці працоўных. У якасці мэтавай функцыі такой метадкі выкарыстоўваецца мінімум удзельнай масы СГ з ДЗА. Ужыванне дзевяціфазнай абмоткі забяспечвае полігарманічны рэжым працы СГ з ДЗА, што дазваляе паменшыць яго ўдзельную масу. Для перадачы найбольшай долі актыўнай магутнасці генератара ў нагрузку распрацаваны спосаб узгаднення полігарманічных высілкаў і токаў за кошт незалежнага вектарнага кіравання прасторавымі гарманічнымі складнікамі току ў дзевяціфазнай абмотцы. Для рэалізацыі кіравання токам у абмотцы дзевяціфазнага СГ з ДЗА распрацавана яго дакладная матэматычная мадэль, якая ўлічвае асаблівасці доследнага класа электрычных машын і павелічэнне колькасці фазных электрамагнітных зменных.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: вынікі даследавання могуць быць выкарыстаны пры распрацоўцы электрамеханічных пераўтваральнікаў энергіі для аўтаномных сістэм электразабеспячэння.

Вобласць прымянення: праектаванне і стварэнне перспектыўных электрамеханічных пераўтваральнікаў энергіі з палепшанымі тэхнічнымі характарыстыкамі.

РЕЗЮМЕ

Пантелеев Станислав Владимирович

Улучшение энергетических и массогабаритных показателей системы «синхронный электрический генератор с девятифазной дробной зубцовой обмоткой – активный выпрямитель напряжения»

синхронный электрический генератор, многофазная обмотка, дробная зубцовая обмотка, математическая модель, методика параметрического синтеза, полигармонический режим, векторное управление

Цель диссертации состоит в разработке принципов реализации полигармонического режима работы синхронного электрического генератора с многофазной дробной зубцовой обмоткой для улучшения его энергетических и массогабаритных показателей.

Методы исследования: методы теории магнитных цепей и поля, а также методы математического моделирования электрических машин.

Полученные результаты и их новизна. Разработана методика параметрического синтеза синхронных генераторов с дробными зубцовыми обмотками (СЭГ с ДЗО) при реализации высших гармоник ЭДС и тока в многофазной обмотке в качестве рабочих. В качестве целевой функции такой методики используется минимум удельной массы СЭГ с ДЗО. Применение девятифазной обмотки обеспечивает полигармонический режим работы СЭГ с ДЗО, что позволяет уменьшить его удельную массу. Для передачи наибольшей доли активной мощности генератора в нагрузку разработан способ согласования полигармонических напряжений и токов за счет независимого векторного управления пространственными гармоническими составляющими тока в девятифазной обмотке. Для реализации управления током в обмотке девятифазного СЭГ с ДЗО разработана его достоверная математическая модель, которая учитывает особенности исследуемого класса электрических машин и увеличение числа фазных электромагнитных переменных.

Рекомендации по использованию: результаты исследования могут быть использованы при разработке электромеханических преобразователей энергии для автономных систем электроснабжения.

Область применения: проектирование перспективных электромеханических преобразователей энергии с улучшенными техническими характеристиками.

SUMMARY

Pantelev Stanislav

Improving the energy and weight and size indicators of the system "synchronous electric generator with a nine-phase fractional tooth winding - active voltage rectifier"

synchronous electric generator, multiphase winding, fractional tooth winding, mathematical model, parametric synthesis technique, polyharmonic mode, vector control

The purpose of the dissertation is to develop principles for the implementation of the polyharmonic mode of operation of a synchronous electric generator with a multiphase fractional tooth winding to improve its energy and weight and size indicators.

The research methods: methods of the theory of magnetic circuits and fields, as well as methods of mathematical modeling of electric machines.

The results obtained and their novelty. A technique has been developed for parametric synthesis of synchronous generators with fractional tooth windings (SG FTW) in the implementation of higher harmonics of EMF and current in a multiphase winding as working ones. As the objective function of this technique, the minimum specific gravity of the SG FTW is used. The use of a nine-phase winding provides a polyharmonic operation mode of the SG FTW, which makes it possible to reduce its specific mass. To transfer the largest share of the active power of the generator to the load, a method has been developed for matching polyharmonic voltages and currents due to independent vector control of the spatial harmonic components of the current in a nine-phase winding. To implement the current control in the winding of a nine-phase SG FTW, its reliable mathematical model has been developed, which takes into account the features of the studied class of electrical machines and an increase in the number of phase electromagnetic variables.

Usage recommendations: the results of the study can be used in the development of electromechanical energy converters for an autonomous power supply system.

Application: the results of the study can be used in the development of electromechanical energy converters for an autonomous power supply systems.

Соискатель



С.В. Пантелеев

Научное издание

ПАНТЕЛЕЕВ
Станислав Владимирович

**УЛУЧШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И МАССОГАБАРИТНЫХ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИСТЕМЫ «СИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ
ГЕНЕРАТОР С ДЕВЯТИФАЗНОЙ ДРОБНОЙ ЗУБЦОВОЙ
ОБМОТКОЙ – АКТИВНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ»**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы

Ответственный за выпуск С.В. Пантелеев
Компьютерная верстка С.В. Пантелеева

Подписано в печать 31.07.2023. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 1,56. Уч.-изд. л. 1,10. Тираж 60. Заказ 428.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждения образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий
№ 1/359 от 09.06.2014.
№ 2/151 от 11.06.2014.
Пр-т Независимости, 99–1, 220012, Минск.