

Отзыв

официального оппонента Колпахчяна Павла Григорьевича на диссертацию Сафина Альфреда Робертовича на тему «Методы проектирования и создание синхронных электрических машин с постоянными магнитами в составе генерирующих и приводных комплексов», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты»

Актуальность темы диссертации

Синхронные электрические машины с постоянными магнитами находят все большее применение в различных технических комплексах.

Синхронные электрические двигатели с постоянными магнитами используются в областях, где традиционно применялись двигатели постоянного тока или асинхронные двигатели, таких, как привод циркулярных насосов, привод компрессоров в холодильной технике, в системах вентиляции, в буровых установках, в станках-качалках добычи нефти. Причинами этого являются существующая тенденция к уменьшению стоимости магнитных материалов (внедрением сплавов редкоземельных металлов), а также совершенствование аппаратной базы управления. В дополнение к высокой энергоэффективности современные синхронные электрические двигатели с постоянными магнитами имеют более компактную конструкцию.

Из научных проблем, стоящих перед проектными организациями, прежде всего, необходимо выделить то, что большинство методов, ограничено проектированием синхронных электрических машин с постоянными магнитами без учета их работы в составе генерирующих и приводных комплексов и влияния динамических и тепловых процессов, не используются методы топологической оптимизации индукторов и роторов синхронных электрических машин с постоянными магнитами, позволяющие определить новые конструктивные решения для создания энергоэффективных синхронных электрических машин с постоянными магнитами.

Диссертационная работа Сафина А.Р. посвящена разработке методов расчета параметров с целью создания энергоэффективных синхронных электрических машин с постоянными магнитами в составе генерирующих и приводных комплексов.

Таким образом, диссертация «Методы проектирования и создание синхронных электрических машин с постоянными магнитами в составе генерирующих и приводных комплексов» является актуальной и представляет научный и практический интерес.

Краткая характеристика работы

Во введении представлена общая характеристика диссертационной работы: актуальность, цель, задачи исследований, научная новизна и практическая значимость, методы исследований, достоверность, реализация и внедрение полученных результатов, апробация и публикации научных статей, основные защищаемые положения работы. Приведены структура и краткое содержание диссертации.

В главе 1 диссертации проанализировано современное состояние автономных источников электроснабжения. Показано, что одним из перспективных направлений позволяющим значительно улучшить характеристики систем автономного электроснабжения является применение свободно-поршневых двигателей с линейными бесконтактными синхронными генераторами электроэнергии с постоянными магнитами. Важным преимуществом свободно-поршневых двигателей при использовании его с синхронной электрической машиной возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами является возможность изменения геометрической степени сжатия в двигателе, что позволяет работать не только на бензине всех марок, но и на дизельном топливе, биотопливе и газовом топливе.

Проектирование и оптимизация параметров синхронных электрических двигателей с постоянными магнитами является актуальной задачей, так как данный тип двигателей всё больше распространяется на области, где традиционно

применялись двигатели постоянного тока или асинхронные двигатели, таких, как привод циркулярных насосов, привод компрессоров в холодильной технике, системах вентиляции, буровые установки, станках-качалках по добычи нефти. Одним из перспективных направлений внедрения синхронного электрического двигателя с постоянными магнитами является нефтедобывающая отрасль. Электропривод штанговой скважинной насосной установки является одним из важнейших компонентов данных установок. За счет высокого коэффициента мощности и КПД синхронных электрических двигателей с постоянными магнитами, снижаются потери в системе электроснабжения нефтяных полей, растет КПД всей системы по сравнению с применением асинхронных двигателей.

Обоснована необходимость разработки алгоритмов и методов многопараметрической и топологической оптимизации параметров синхронных электрических машин с постоянными магнитами.

В главе 2 диссертации приведено решение уравнение баланса сил в свободно-поршневом двигателе, что позволяет определить положение и скорость индуктора синхронной электрической машиной возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами. Разработана методика расчета электромагнитной силы синхронной электрической машиной возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами через отображение уравнения линейной токовой нагрузки и индукции магнитного поля, создаваемого постоянными магнатами, в виде ряда Фурье. Разработана тепловая модель синхронной электрической машиной возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами, позволяющая определить конструкцию системы охлаждения статора.

В главе 3 разработана математическая модель приводного комплекса штанговой скважинной насосной установки, которая позволяет рассчитать мгновенную электрическую мощность, потребляемую приводным двигателем. Показано, что конструкция ротора синхронного электрического двигателя с

постоянными магнитами коллекторного типа обеспечивает более высокую магнитную индукцию в воздушном зазоре.

Важнейшим этапом проектирования синхронного электрического двигателя с постоянными магнитами является расчет магнитной системы, которую можно осуществить на основе метода эквивалентных магнитных цепей. Предложена эквивалентная схема магнитной цепи синхронного двигателя с встроенными магнитами в составе станка-качалки нефти. Получена система уравнений, которая позволяет рассчитать размеры магнитов, магнитный поток и необходимые свойства постоянного магнита при заданной конструкции ротора и статора.

В главе 4 диссертации разработаны система моделирования термодинамических процессов в свободнопоршневом двигателе внутреннего сгорания в составе автономного источника электроснабжения, система моделирования электромеханических процессов, система моделирования тепловых процессов в синхронной электрической машине возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами. Разработана система управления базами данных на базе *Microsoft Excel* с целью расчета и оптимизации параметров синхронной электрической машиной возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами.

В главе 5 диссертации разработаны методики оптимизации конструктивных размеров статора и индуктора синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами по критерию максимума намагничивающей силы и по критерию максимальной генерируемой мощности. Разработана методика многокритериальной оптимизации конструктивных параметров ротора синхронного электрического двигателя с встроенными постоянными магнитами, позволяющая получить приблизительное множество оптимальных по Парето решений. Разработан метод топологической оптимизации для распределения материалов в индукторах и роторах синхронных электрических машинах с постоянными магнитами с использованием генетического алгоритма. Предложена концепция кластеризации материалов и процедура «очистки» материалов. Разработан программный комплекс по

оптимизации конструктивных параметров электрической машины. Предложена концепция параллельного моделирования для обмена данными между различными программами и повышения эффективности, точности моделирования и оптимизации конструктивных размеров деталей автономного источника электроснабжения.

В главе 6 разработан испытательный стенд для проведения углубленных исследований характеристик синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами, разработан экспериментальный образец синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия мощностью 3-11 кВт, с температурным рабочим диапазоном от 0°C до 150°C и усилием на индукторе электрической машины до 11 кН с использованием новых методических и конструктивных решений, имеющего модульную конструкцию и предназначенного для генерации электрической энергии и привода механизмов в агрессивной среде в составе автономных объектов. Показано, что разработанная математическая модель синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами обеспечивает точность полученных результатов, обеспечивающую степень совпадения результатов математического моделирования и исследовательских испытаний погрешностью не более 3 %. Установлено, что адекватность математического моделирования позволяет воспроизводить заданные свойства, состояние и поведение исследуемого объекта с достаточной для поставленных целей точностью и в условиях достаточно широкого диапазона изменения входных параметров. Результаты работы показывают перспективность дальнейшей разработки генераторных комплексов на базе свободнопоршневого двигателя и полученные характеристики экспериментального образца сопоставимы с аналогичными работами, определяющими мировой уровень.

В «Основных результатах и выводах» изложены основные результаты по диссертационной работе.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, представленных в диссертации, подтверждается их корреляцией с результатами экспериментальных исследований, описанных в диссертационной работе, а также в научных статьях, опубликованных диссертантом и другими авторами. Результаты диссертации опубликованы в ведущих научных журналах, представленных в российских (РИНЦ) и ведущих международных (Web of Science и Scopus) базах данных, прошли апробацию на международных и всероссийских конференциях. Следует также отметить руководство Сафиним А.Р. двумя научными проектами, в которых нашли отражение результаты диссертационного исследования: проект РФФИ № 17-48-160438 «Разработка нового метода проектирования и программно-аппаратного комплекса для повышения энергоэффективности и надежности линейных электрических машин возвратно-поступательного действия», 2017 г.; проект РФФИ № 18-48-160023 «Разработка метода проектирования и топологической оптимизации роторов синхронных двигателей с постоянными магнитами для привода станков-качалок с целью повышения энергоэффективности нефтедобычи», 2018-2020 гг.

Научная новизна.

Автором впервые получены следующие оригинальные результаты:

1. Разработана математическая модель работы свободнопоршневого двигателя стандартного цикла Отто с учетом диаметра цилиндров, массы поршневой группы и индуктора, степени сжатия, хода поршня, теплоты сгорания топлива и сил трения, позволяющая определить положение и скорость индуктора синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами в составе автономного источника электроснабжения, для последующего расчета энергетических характеристик и оптимизации конструктивных параметров синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами.

2. Разработана методика расчета электромагнитной силы синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами через отображение уравнения линейной токовой нагрузки и индукции магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами, в виде ряда Фурье, что позволяет ввести в расчетные формулы конструктивные параметры статора и индуктора синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами с целью повышения качества алгоритма оптимизации.

3. Разработана тепловая модель синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами, позволяющая определить конструкцию системы охлаждения статора, рассчитать максимально допустимую выдаваемую мощность синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами, определить параметры, влияющие на теплоотдачу, определить меры по тепловой защите синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами.

4. Предложена эквивалентная схема магнитной цепи синхронного двигателя с встроенными магнитами в составе станка-качалки нефти. Полученная на основе данной схемы система уравнений позволяет аналитически определять требуемые размеры магнитов по заданному значению магнитного потока и заданным размерам ротора и статора двигателя, и магнитный поток, рабочую точку магнита при известной конструкции ротора и статора.

5. Разработан комплекс имитационных моделей автономного источника электроснабжения на базе синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами, что позволяет на основе единой базы данных совместить моделирование тепловых, механических и электромагнитных процессов и оптимизацию конструктивных параметров синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами.

6. Разработаны новые методики оптимизации конструктивных размеров статора и индуктора синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами по критерию максимума намагничивающей силы и максимальной генерируемой мощности на основе генетического алгоритма, что позволяет рассматривать при проектировании двигательный и генераторный режимы синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами.

7. Предложена методика многокритериальной оптимизации конструктивных параметров ротора синхронного электрического двигателя с встроенными постоянными магнитами, позволяющая получить множество допустимых решений, что предоставляет проектировщику, имея информацию о предпочтительных характеристиках, определить наиболее приемлемое решение.

8. Разработан новый метод топологической оптимизации для распределения материалов в индукторах и роторах синхронных электрических машин с постоянными магнитами с использованием генетического алгоритма, что позволяет проектировать синхронные электрические машины с постоянными магнитами с новыми топологиями (в том числе и с новыми композиционными материалами), более высокой энергоэффективностью и низкой стоимостью производства.

Практическая значимость работы

1. Разработан программный комплекс, реализующий алгоритмы расчета термодинамических процессов в свободно-поршневом двигателе внутреннего сгорания, электромеханических процессов в синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами, тепловых процессов в синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами, а также позволяющий производить прочностные расчеты конструкции синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами и оптимизацию

конструктивных параметров генерирующего комплекса с свободно-поршневым двигателе внутреннего сгорания на базе синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами.

2. Изготовлен экспериментальный образец синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия мощностью 3-11 кВт, с температурным рабочим диапазоном от 0°C до 150°C и усилием на индукторе электрической машины до 11 кН, разработанный с использованием новых методических решений, имеющий модульную конструкцию и предназначенный для генерации электрической энергии и привода механизмов в агрессивной среде в составе автономных объектов.

3. Изготовлен испытательный стенд для проведения исследований кинематических, динамических, энергетических и тепловых характеристик синхронных электрических машин с постоянными магнитами.

4. Разработана конструкторская документация для экспериментального образца синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия и испытательного стенда.

5. Разработано программное обеспечение для проектирования индукторов и роторов синхронных электрических машин с постоянными магнитами (Свидетельство № 2018613530, Свидетельство № 2019610240).

6. Разработан опытный образец синхронного двигателя 11 ДВМ160 рассчитанный по предложенным методикам многокритериальной оптимизации конструктивных параметров ротора. Данный вариант рассматривался при проектировании станций управления для станков качалок нефти совместно с АО «ЧЭАЗ».

Соответствие содержания диссертации паспорту научной специальности

Диссертация соответствует паспорту специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты» и напрямую отвечает следующим пунктам паспорта специальности:

1. Разработка научных основ создания и совершенствования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов.

2. Разработка методов анализа и синтеза преобразователей электрической и механической энергии.

3. Разработка подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих проектирование, надежность, контроль и диагностику функционирования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов в процессе эксплуатации, в составе рабочих комплексов.

Замечания по диссертационной работе

Вместе с тем, по результатам диссертационной работы можно сделать ряд замечаний:

1. В главе 5 разработан программный комплекс по оптимизации электрических машин и выполнен расчет только одного типа рассматриваемых синхронных машин. Следовало бы провести расчет ряда генераторов и двигателей с различными номинальными мощностями, с целью выявления характерных закономерностей при проектировании этих машин.

2. При проведении прочностных расчетов неясно, учитывалось ли влияние сил притяжения постоянных магнитов на распределение усилий, действующих на магнит.

3. В экспериментальном стенде для проведения физических исследований генератора, используется гидромотор вращательного типа с кривошипно-шатунным механизмом, что не вполне соответствует характеристикам свободно-поршневого двигателя внутреннего сгорания.

4. При выборе предварительных оптимальных размеров следовало бы использовать трехмерные графики, вместо двухкоординатных, так как они более информативные, и позволяют точнее определить оптимальные размеры.

5. Из текста диссертации (глава 2, глава 5) неясно, чем обоснован выбор синусоидального закона движения подвижной части. Характер движения

определяется влиянием сил, действующих на ротор, и коэффициентами системы дифференциальных уравнений.

6. В диссертационном исследовании следовало бы подробнее рассмотреть компенсацию реактивной мощности синхронными двигателями с постоянными магнитами в системе электроснабжения нефтедобывающей организации.

7. Одним из оптимизируемых параметров синхронного двигателя с постоянными магнитами является радиус ротора, но что происходит с радиусом статора и, как следствие, с линейной нагрузкой при изменении радиуса ротора. Требуется пояснить, как это учитывается в алгоритме оптимизации.

8. В диссертационной работе следовало бы подробнее разъяснить алгоритм выбора оптимальных по Парето решений.

Заключение

Диссертация является законченным научным трудом, посвященным решению актуальной научно-технической проблемы –повышения энергетической эффективности, технологичности электромеханических преобразователей, снижения их себестоимости и эксплуатационных затрат.

Результаты диссертации представлены в 47 публикациях, включающих 14 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 11 статей индексируемых в международных базах данных SCOPUS или/и Web of Science, 1 коллективную монографию, 2 патента на полезную модель, 7 свидетельств на программы для ЭВМ. Автореферат диссертации полно отражает содержание работы.

Диссертационная работа соответствует специальности 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты» и требованиям пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней» Постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

По актуальности и уровню научных и практических результатов представленная диссертационная работа «Методы проектирования и создание синхронных электрических машин с постоянными магнитами в составе

генерирующих и приводных комплексов», соответствует требованиям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденным Постановлением Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842, а ее автор, Сафин Альфред Робертович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.01 - «Электромеханика и электрические аппараты».

Официальный оппонент,

заведующий кафедрой «Электрические машины и аппараты» ФГБОУ ВО РГУПС,

доктор технических наук, доцент,

Колпахчян Павел Григорьевич

ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС)»

344038, г.Ростов-на-Дону, пл.Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д.2

Тел. +7 (863) 272-65-12

E-mail: ema@rgups.ru

Подпись

УДОСТОВЕРЯЮ

Начальник управления делами
ФГБОУ ВО РГУПС

« 21 »

01

20



Т.М. Канина