

ОТЗЫВ

официального оппонента 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

В настоящее время большое внимание уделяется бесконтактным электрическим машинам переменного тока, обладающими высокой надежностью, малой массой и габаритными размерами, возможностью работать в нестандартных окружающих условиях. Их роль в автономной электроэнергетике постоянно возрастает. Повысить энергетические характеристики синхронных электрических машин с постоянными магнитами возможно за счет использования новых материалов (на основе редкоземельных материалов, высокопрочных сплавов), новых топологий и конструктивных решений, полученных на основе современных систем проектирования и оптимизации.

Одной из перспективных областей применения синхронных электрических двигателей с постоянными магнитами является нефтедобывающая отрасль. В настоящее время на нефтедобывающих предприятиях России насчитывается более ста тысяч станков-качалок штанговых скважинных насосных установок, предназначенных для подъема пластовой жидкости из скважин, с электроприводами мощностью от 1,5 до 45 кВт. Электропривод является одним из важнейших компонентов данных установок. Повышение его работоспособности является ключевой задачей для снижения себестоимости добываемой нефти. За счет высокого коэффициента мощности и КПД синхронных электродвигателей, снижаются потери в системе электроснабжения нефтяных полей, растет КПД всей системы по сравнению с применением асинхронных двигателей.

На основании вышеизложенного, считаю, что тема диссертационной работы Сафина А.Р., посвящённая разработке методов расчета параметров 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, основные защищаемые положения. Приведены структура и краткое содержание диссертационной работы.

В главе 1 диссертации проведен анализ современного состояния автономных источников электроснабжения. Показано, что одним из перспективных направлений является использование в автономных источниках электроснабжения свободно-поршневых двигателей совместно с линейными бесконтактными синхронными генераторами электроэнергии с постоянными магнитами, обладающих повышенной надежностью, высокими динамическими качествами, малыми массами и габаритными размерами за счет повышенных механических, электромагнитных и тепловых нагрузок. Также 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. Повышение его работоспособности является ключевой задачей для снижения себестоимости добываемой нефти. Обоснована необходимость разработки алгоритмов и методов многопараметрической и топологической оптимизации параметров синхронных электрических машин с постоянными магнитами.

В главе 2 диссертации разработаны математические модели автономного источника электроснабжения на базе синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами, что позволяет провести расчет и оптимизацию конструктивных параметров индуктора и статора электрической машины возвратно-поступательного действия.

В главе 3 разработана математическая модель приводного комплекса штанговой скважинной насосной установки, позволяющая рассчитать мгновенную электрическую мощность, потребляемую приводным двигателем, обоснована конструкция ротора синхронного электрического двигателя с постоянными магнитами коллекторного типа, позволяющая обеспечить более высокую магнитную индукцию в воздушном зазоре. Основным достоинством коллекторной конструкции магнитной системы ротора является максимальное использование энергии магнитов. Коллекторная конструкция позволяет обеспечить более высокую магнитную индукцию в воздушном зазоре, чем в радиальной магнитной системе. Предложена эквивалентная схема магнитной цепи синхронного двигателя с встроенными магнитами в составе станка-качалки нефти. Полученная система уравнений позволяет рассчитать необходимые размеры магнитов и магнитный поток и необходимые свойства постоянного магнита при заданной конструкции ротора и статора.

В главе 4 диссертации проведено моделирование термодинамических процессов в свободнопоршневом двигателе внутреннего сгорания,

электромеханических процессов и электромагнитного поля в синхронной электрической машине возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами, тепловых процессов в синхронной электрической машине возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами. Разработана система управления базами данных на базе *Microsoft Excel* с целью повышения эффективности и точности моделирования и оптимизации.

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. Реализована 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 проведено исследование на испытательном стенде 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. Установлено, что 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 %. Выявлено, 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**» представлены основные результаты по диссертационной работе.

Научная новизна

1. Разработана математическая модель работы свободнопоршневого двигателя с учетом параметров автономного источника электроснабжения, позволяющая определить положение и скорость индуктора синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами, для последующей оптимизации его конструктивных параметров.

2. Предложена методика расчета электромагнитной силы синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия через отображение уравнения линейной токовой нагрузки и индукции магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами, в виде ряда Фурье, что позволяет повысить качество алгоритма оптимизации.

3. Разработанная тепловая модель синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия, позволяет определить конструкцию системы охлаждения статора, рассчитать максимально допустимую выдаваемую мощность, определить меры по тепловой защите синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия.

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

5. Разработаны новые методики оптимизации конструктивных размеров статора и индуктора синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия по критерию максимума намагничивающей силы и максимальной генерируемой мощности на основе генетического алгоритма.

6. Разработан новый метод топологической оптимизации для распределения материалов в индукторах и роторах синхронных электрических машин с постоянными магнитами с использованием генетического алгоритма, что позволяет рассчитывать новые топологии для повышения энергетических характеристик электрических машин.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов, представленных в диссертации, подтверждается:

- использованием современных физических представлений для интерпретации экспериментальных данных;

- соответствием результатов анализа данных, полученных в работе, встречающимися в литературе, в тех случаях, когда такое сравнение возможно;

- проведением комплексных исследований с использованием современных автоматизированных аналитических методов;

- апробацией основных научных результатов на научно-технических конференциях, семинарах и выставках (V Международном симпозиуме «Ресурсоэффективность и энергосбережение» (г. Казань, 2004 г.); VI Международном симпозиуме «Ресурсоэффективность и энергосбережение» (г. Казань, 2005 г.); X Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (г. Казань, 2015 г.); XV Международном симпозиуме «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение» (г. Казань, 2015 г.); Семинаре «Развитие научно-технического сотрудничества России и ЕС в области повышения энергетической эффективности» (г. Москва, 2015 г.); VII Международной научной конференции молодых ученых «Электротехника. Электротехнология. Энергетика» (г. Новосибирск, 2015 г.); Выставке «ВУЗПРОМЭКСПО-2015» (г. Москва, 2015 г.); Международной специализированной выставке «Энергетика. Ресурсосбережение-2016» (г. Казань, 2016г.); Выставке «ВУЗПРОМЭКСПО-2016» (г. Москва, 2016 г.); International Scientific and Technical Conference SES-2019 (Kazan, September 18-20, 2019г.);

- опубликованием статей, содержащих результаты работ, в научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus.

Практическая значимость работы

- разработанный программный комплекс, реализующий алгоритмы расчета термодинамических процессов в свободнопоршневом двигателе, электромеханических процессов в синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия, тепловых процессов в синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия, а также позволяющий производить прочностные расчеты конструкции синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия и оптимизацию конструктивных параметров генерирующего комплекса с свободнопоршневым двигателем на базе синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия мог бы эффективно использоваться для задач оптимизации синхронных генераторов с

постоянными магнитами для альтернативных источников электроэнергии;

- изготовленный экспериментальный образец синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия, разработанный с использованием новых методических решений, предназначенный для генерации электрической энергии и привода механизмов в агрессивной среде в составе автономных объектов мог бы использоваться для отладки алгоритмов управления при совместном использовании с двигателем внутреннего сгорания;

- разработанное программное обеспечение для проектирования индукторов и роторов синхронных электрических машин с постоянными магнитами может использоваться для проектирования последующего производства высокоэффективных синхронных электрических двигателей с постоянными магнитами для привода станков-качалок нефти, разработка погружных линейных электрических для привода плунжерных насосов в малобитных скважинах; производство энергоэффективных электроприводов с улучшенными массогабаритными характеристиками.

Замечания по диссертационной работе

По содержанию диссертационной работы имеется ряд замечаний и вопросов:

1. В четвертой и пятой главах недостаточно полно представлены вопросы выбора основных размеров линейной электрической машины.

2. Требуется пояснить, как учитывались потери на гистерезис в статоре синхронной машины на основной частоте и на высших гармониках?

3. Разработанная аналитическая модель, основанная на электромагнитных уравнениях эквивалентной магнитной цепи, служит для предварительного анализа двигателя и проверки осуществимости метода конечных элементов. Для повышения точности используется модель метода конечных элементов с помощью программы Elcut. Желательно обосновать, как эти модели сопрягаются и почему повышается точность.

4. Не показано, при помощи каких программ, кроме Elcut, организован генетический алгоритм, какая программа генерировала популяции, и как организована связь между данными программами.

5. Встречаются отдельные повторы слов, излишнее употребление сокращений, нечеткие формулировки, новые термины, такие как Верификация в оглавлении, оппозиционно – намагниченными магнитами, качающаяся сила, схема замещения обмотки (стр.95), пропуски нумерации (после (2.62) следует (2.66), присутствие размерности в формуле (2.91) и т.д.

6. При проектировании электромеханических преобразователей важно учитывать ограничения на максимальные токи, с целью оценки размагничивания постоянных магнитов, но для линейной машины это не сделано.

7. В четвертой главе следовало бы привести систему дифференциальных уравнений для имитационного моделирования синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия, так как во второй главе они не приведены в окончательном виде.

8. В тексте диссертации имеется путаница в терминологии. В (2.62) $F_x(x,t)$ – это электромагнитная сила, в (2.66) – намагничивающая сила, в (2.69) – электромагнитная сила намагничивания.

9. Непонятно, зачем в разделе (3.2.2.) подробно приводятся характеристики магнитов, они широко известны.

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.

Заключение

Диссертационная работа Сафина А.Р. содержит научную и практическую ценность и представляет собой законченную научно-квалификационную работу, результатом которой является решение научной проблемы проектирования и оптимизации конструктивных параметров с целью создания энергоэффективных синхронных электрических машин с постоянными магнитами, предназначенных для генерации электрической энергии в составе автономных энергоустановок и привода различных механизмов.

Автореферат диссертации в достаточной мере 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.

Результаты исследования достоверны и апробированы на российских и международных научных конференциях, форумах и семинарах. Уровень и объем публикаций автора, отражающих основные полученные результаты, соответствуют требованиям пунктов 11 и 13 «Положения о присуждении ученых степеней» Постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

Представленная диссертация «Методы проектирования и создание синхронных электрических машин с постоянными магнитами в составе генерирующих и приводных комплексов», отвечает 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 электромеханики
ФГБОУ ВО «Новосибирский
государственный технический университет»,
доктор технических наук, профессор

А.Ф.Шевченко

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский государственный
технический университет»
630073, г. Новосибирск, пр-т К.Маркса, 20
Тел.: +7 (383) 346-08-43; +7 (383) 346-13-87
Адрес электронной почты: rector@nstu.ru; a.shevchenko@corp.nstu.ru
Web-сайт: www.nstu.ru

20.02.2020

Подпись Шевченко А.Ф. заверяю:
Ученый секретарь НГТУ д.т.н., профессор



Г.М. Шумский