

О Т З Ы В
официального оппонента
на диссертационную работу
Сафина Альфреда Робертовича
«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

Для рассмотрения официальному оппоненту представлены следующие материалы:

- 1) диссертационная работа на 352 страницах машинописного текста формата А4, состоящая из введения, шести глав, заключения, списка используемой литературы и десяти приложений;
- 2) автореферат на 40 страницах формата А5.

Актуальность темы

Диссертационная работа Сафина А. Р. посвящена разработке методов проектирования с целью создания энергоэффективных синхронных электрических машин с постоянными магнитами, предназначенных для работы в составе генерирующих и приводных комплексов.

В настоящее время в автоматизированном электроприводе за счет снижения стоимости материалов для изготовления постоянных магнитов, стремительного развития полупроводниковой преобразовательной техники и цифровой электроники синхронные электрические машины с постоянными магнитами могут успешно конкурировать с двигателями постоянного тока и даже асинхронными двигателями.

В связи с все более широким применением объектов малой распределенной генерации возрастает роль синхронных электрических машин с постоянными магнитами и в составе генераторных комплексов малой энергетики.

Поэтому актуальность темы рассматриваемой диссертационной работы не вызывает сомнений.

Оценка структуры и содержания работы

Во В в е д е н и и обоснованы актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость, положения, выносимые на защиту, приведены сведения по внедрению результатов и апробации работы, а также структура и краткое содержание диссертации.

В первой главе на основании проведенного автором анализа отечественных и зарубежных источников по созданию и исследованию автономных источников электроснабжения сделан вывод, что одним из перспективных направлений создания автономных источников электроснабжения является совместное использование свободно-поршневых двигателей с синхронными электрическими машинами возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами, обладающих повышенной надежностью, высокими динамическими качествами, хорошими массо-габаритными показателями. Показано, что одним из перспективных направлений внедрения синхронного электрического двигателя с постоянными магнитами является нефтедобывающая отрасль. Электропривод штанговой скважинной насосной установки определяет энергетическую эффективность данных установок. Повышение КПД приводного двигателя позволит снизить себестоимость добываемой нефти. Сделан вывод, что разработка алгоритмов и методов многопараметрической и топологической оптимизации параметров синхронных электрических машин с постоянными магнитами является важным условием повышения энергоэффективности генерирующих и приводных комплексов.

Вторая глава диссертации посвящена разработке математических и численных моделей генерирующего комплекса 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. Разработана тепловая модель синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами, которая позволяет определить максимально допустимую выдаваемую мощность, рассчитать параметры, влияющие на теплоотдачу и соответственно улучшить тепловую защиту синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами.

В третьей главе разработана математическая модель приводного комплекса штанговой скважинной насосной установки, которая на основании конструктивных и кинематических параметров станка-качалки позволяет определить мгновенную электрическую мощность, потребляемую приводным двигателем. Предложена конструкция ротора синхронного электрического двигателя с постоянными магнитами коллекторного типа, что обеспечивает более высокую магнитную индукцию в воздушном зазоре, чем в радиальной магнитной системе. Обоснована эквивалентная схема магнитной цепи синхронного двигателя с встроенными магнитами в составе станка-качалки нефти. Полученная система уравнений позволяет рассчитать требуемые размеры магнитов и

магнитный поток, и определить свойства постоянного магнита при заданной конструкции ротора и статора.

В четвертой главе проводится имитационное 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. В *Microsoft Excel* разработана система управления базами данных с целью повышения эффективности моделирования и оптимизации параметров автономного источника электроснабжения.

Пятая глава диссертации посвящена разработке методики оптимизации по критерию максимума намагничивающей силы и по критерию максимальной генерируемой мощности, которые позволяют рассчитать конструктивные размеры статора и индуктора синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами. Разработана методика многокритериальной оптимизации конструктивных параметров ротора синхронного электрического двигателя с встроенными постоянными магнитами, позволяющая проектировщику выбрать рациональный вариант, исходя из требований к электроприводу. Разработан метод топологической оптимизации для распределения материалов в индукторах и роторах синхронных электрических машинах с постоянными магнитами с использованием генетического алгоритма. Предложена концепция объединения материалов в группы и разработана процедура «очистки» материалов с целью получения однородных структур в индукторах и роторах для повышения технологичности и снижения стоимости изготовления. Разработан программный комплекс для оптимизации конструктивных параметров электрической машины, с целью реализации концепции параллельного моделирования для обмена данными между различными программами, повышения точности моделирования и оптимизации конструктивных размеров деталей автономного источника электроснабжения.

В шестой главе разработан испытательный стенд для исследования характеристик экспериментального образца 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, имеющий модульную конструкцию и предназначенный для генерации электрической энергии и привода механизмов в агрессивной среде в составе автономных объектов. Разработанная математическая модель синхронной

электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами обеспечивает высокую точность результатов математического моделирования. Сравнительный анализ результатов компьютерного моделирования и исследовательских испытаний показывает, что погрешность вычислений не превышает 3%. Адекватность математической модели позволяет воспроизводить заданные свойства, состояние и поведение исследуемого объекта с достаточной для поставленных целей точностью при достаточно широком диапазоне изменения входных параметров. Представленные результаты обосновывают перспективность дальнейшей разработки генераторных комплексов на базе свободнопоршневого двигателя, а полученные характеристики экспериментального образца сопоставимы с аналогичными работами, определяющими мировой уровень. Оценка основных технических характеристик проводилась с использованием данных лабораторных образцов генераторных комплексов и опубликованных результатов экспериментальных исследований.

В разделе «О с н о в н ы е р е з у л ь т а т ы и в ы в о д ы» сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Методы исследования

Для решения поставленных задач использовались методы теоретических основ электротехники, теории электрических машин, теории теплотехники, теории оптимизации. Исследования проводились с использованием сред математического моделирования *MatLab 2010*, *Comsol Multiphysics*, *Elcut*. Для проверки корректности математических моделей использовались экспериментальные исследования на испытательном стенде.

Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов диссертационной работы обеспечивается корректной постановкой исследовательских задач, их физической обоснованностью, использованием современного программного обеспечения и комплексным подходом к проведению исследований; совпадением теоретических и экспериментально полученных результатов; а также совпадением с результатами подобных исследований других авторов; использованием сертифицированных и поверенных образцов и контрольно-измерительной аппаратуры, а также применением математического анализа при обработке полученных результатов с использованием современных средств вычислительной техники.

**Соответствие паспорту научной специальности 05.09.01 –
Электромеханика и электрические аппараты**

Объект исследования – синхронные электрические машины с постоянными магнитами.

Предмет исследования – методы расчета параметров синхронных электрических машин с постоянными магнитами в составе генерирующих и приводных комплексов.

Объект исследования, предмет исследования, область исследований и полученные в работе научные результаты соответствуют следующим пунктам паспорта научной специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты:

разработка научных основ создания и совершенствования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов (п. 2);

разработка методов анализа и синтеза преобразователей электрической и механической энергии (п. 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 (п. 5).

Научная новизна представленной диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработана математическая модель работы свободнопоршневого двигателя внутреннего сгорания 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 возможность проектировщику, имея информацию о предпочтительных характеристиках, определить наиболее приемлемое решение.

8. Разработан новый метод топологической оптимизации для распределения материалов в индукторах и роторах синхронной электрической машины с постоянными магнитами с использованием генетического алгоритма, что позволяет проектировать синхронную электрическую машину с постоянными магнитами с новыми топологиями (в том числе и с новыми композиционными материалами), более высокой энергоэффективностью и низкой стоимостью производства.

Практическая ценность и использование результатов диссертационного исследования

Разработанные в диссертации методы и алгоритмы расчета параметров синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами и конструкторская документация для испытательного стенда использованы в прикладных научных исследованиях в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы» Соглашение № 14.577.21.0121 от 20.10.2014 г. «Разработка экспериментального образца обратимой электрической машины возвратно-поступательного действия мощностью 10 – 20 кВт для тяжелых условий эксплуатации».

Методика многокритериальной оптимизации конструктивных параметров ротора синхронного электрического двигателя использована при реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства на тему: «Создание серии электроприводов на базе российских высокоэффективных синхронных двигателей для станков-качалок нефти с применением беспроводных систем передачи данных и адаптивной системой управления для «умных» месторождений», в рамках Государственной программы Российской Федерации «Развитие науки и технологий» на 2013 – 2020 годы, утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218, договор № ДР-936/17 от 26 октября 2017 года с участием ФГБОУ ВО «КГЭУ» и АО «ЧЭАЗ».

Метод топологической оптимизации синхронных электрических машин с постоянными магнитами реализован в рамках грантов Российского фонда фундаментальных исследований «Разработка нового метода проектирования и программно-аппаратного комплекса для повышения энергоэффективности и надежности линейных электрических машин возвратно-поступательного действия» № 17-48-160438 и «Разработка метода проектирования и топологической оптимизации роторов синхронных двигателей с постоянными магнитами для привода станков-качалок с целью повышения энергоэффективности нефтедобычи» № 18-48-160023. Разработано программное обеспечение для проектирования индукторов и роторов (Свидетельство № 2018613530, Свидетельство № 2019610240).

Разработанные математическое и программное обеспечение для расчета и выбора рациональных параметров синхронных электрических машин с постоянными магнитами могут быть использованы НИИ и проектными организациями электротехнической промышленности.

Апробация работы

Работа прошла хорошую апробацию. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международных, Всероссийских, региональных симпозиумах и конференциях, опубликованы в 47 печатных работах, в том числе: 11 статей в изданиях, цитируемых в базах данных *Scopus* и *Web of Science*, 14 статей в изданиях, рекомендуемых ВАК, 1 монография, 2 патента РФ на полезную модель, 7 свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ, изобретение, 12 публикаций в материалах конференций различного уровня.

Автореферат отражает основное содержание диссертационной работы, написан литературным языком с использованием терминологии, принятой в данной отрасли науки и техники, стиль изложения – доказательный.

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. В третьей главе диссертации автор приводит схемы замещения магнитной цепи двигателя с постоянными магнитами, однако не ясно, как проведена линеаризация магнитной характеристики, и как определить без использования итерационных операций с учетом насыщения магнитной цепи размеры магнита по известному потоку в воздушном зазоре.

2. Разработка генераторов возвратно-поступательного действия требует применения методик, которые позволяли бы по заданным значениям индукции в воздушном зазоре и линейной нагрузки, определять основные размеры, однако в диссертации такие методики отсутствуют.

3. В пятой главе представлена программа для оптимизации синхронного двигателя с постоянными магнитами вращательного типа на основе генетического алгоритма. При этом автор не приводит результатов сравнительного анализа показателей двигателя, рассчитанного по известным методикам, и оптимального варианта.

4. В электрических машинах с постоянными магнитами для нормальной работы необходимо, чтобы при всех режимах эксплуатации рабочая точка находилась на линейном участке магнитной характеристики. Для этого следует рассчитывать максимальные токи и температуры с целью оценки размагничивания постоянных магнитов. Этот вопрос в диссертации рассмотрен лишь частично, только в отношении температур нагрева постоянных магнитов.

5. В исследованиях следовало бы рассмотреть влияние продольного краевого эффекта, поскольку магнитопровод линейной электрической машины не является замкнутым.

6. Не рассмотрена тепловая модель для синхронного двигателя с постоянными магнитами, используемая для станков-качалок.

7. При оптимизации синхронного двигателя с постоянными магнитами следовало бы рассчитать серию двигателей для определения критериев подобия

между оптимизируемыми конструктивными параметрами и энергетическими характеристиками.

Заключение по диссертационной работе

Оценивая уровень работы в целом, считаю, что диссертационная работа представляет собой законченное научное исследование на соискание ученой степени доктора технических наук, в ней содержится решение проблемы разработки и совершенствования методов проектирования и создание синхронных электрических машин с постоянными магнитами, которая имеет существенное значение для теории и практики как автоматизированного электропривода технологического оборудования во многих отраслях промышленности, так и электромеханических преобразователей энергии в составе генераторных комплексов малой энергетики.

Представленная диссертационная работа «Методы проектирования и создание синхронных электрических машин с постоянными магнитами в составе генерирующих и приводных комплексов» соответствует требованиям пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней» Постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 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

электропривода и электротехники

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный

исследовательский технологический университет»,

доктор технических наук, доцент,

Макаров Валерий Геннадьевич

Докторская диссертация защищена по специальности
05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет»,

кафедра электропривода и электротехники

420015 г. Казань, ул. К. Маркса, 68

тел. (843) 231-41-27

e-mail: electroprivod@list.ru



удостоверяется.

Начальник ОКД ФГБОУ ВО «КНИТУ»

О.А. Перельгина

20 03 20 20