

УТВЕРЖДАЮ:
Проректор по научной работе
Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Национальный исследовательский
университет «МЭИ»,



В. К. Драгунов

5 » марта 2020 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» 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»

1. Актуальность темы исследования

Диссертация Сафина Альфреда Робертовича посвящена развитию методических решений проектирования, многокритериальной и топологической оптимизации конструктивных параметров и разработке энергоэффективных синхронных электрических машин с постоянными магнитами в составе генерирующих и приводных комплексов.

Диссертация состоит из введения, шести глав, основных результатов и выводов, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 352 страницах текста, включает 148 рисунков, 27 таблиц, список литературы из 209 наименований, содержит 10 приложений.

Синхронные электрические машины с постоянными магнитами применяются во многих технических комплексах. Синхронные электрические двигатели с возбуждением от постоянных магнитов приходят на смену традиционно используемым асинхронным двигателям и двигателям постоянного тока в таких областях, как привод циркулярных насосов, привод компрессоров в холодильной технике, в системах вентиляции, в буровых установках, в станках-качалках по добыче нефти. Синхронные электрические машины с постоянными магнитами применяются в составе генераторных комплексов малой энергетики. В качестве электромеханического преобразователя энергии во многих энергоустановках рационально использовать синхронную электрическую машину возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами, построенную по модульному принципу. Это позволит масштабировать энергоустановку по мощности для конкретной задачи.

Большинство известных методов проектирования синхронных электрических машин с постоянными магнитами не учитывает особенностей работы в составе генерирующих и

приводных комплексов, а также влияния динамических и тепловых процессов. Кроме того, в известных работах не рассмотрены 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.

В связи с этим **тема диссертационной работы** Сафина А. Р. является актуальной и представляет значительный научный и практический интерес.

1. Краткая характеристика работы

Во введении дана 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 диссертации.

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 максимально эффективное использование постоянных 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, магнитный поток и требуемые 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 решений по Парето. 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 описан 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 °С до 150 °С 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. 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 %. 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, а полученные характеристики экспериментального образца сопоставимы с аналогичными работами, определяющими мировой уровень.

В «**Основных результатах и выводах**» представлено обобщение результатов, полученных в диссертационной работе.

2. Цель работы

Цель работы, сформулированная автором, заключается в создании энергоэффективных синхронных электрических машин с постоянными магнитами, предназначенных для генерации электрической энергии в составе автономных энергоустановок и привода различных механизмов.

Столь лаконично обозначенная цель выглядит неопределенной, но критические замечания снимаются из-за четкого перечисления комплекса важнейших методических, программных и технологических задач, раскрывающих сущность «создания»:

1) исследование и анализ основных направлений создания, алгоритмов, методов проектирования и оптимизации синхронных электрических машин с постоянными магнитами в составе генерирующих и приводных комплексов;

2) разработка математических моделей термодинамических, электромеханических процессов в генерирующих и приводных комплексах, включающих в себя проектируемые параметры синхронных электрических машин с постоянными магнитами.

3) разработка методов и алгоритмов для оптимизации конструкции статора, ротора, индуктора и элементов магнитной цепи синхронных электрических машин с постоянными магнитами с целью повышения энергетических характеристик электрической машины и, соответственно, генераторных и приводных комплексов в целом;

4) разработка комплекса программ для моделирования и оптимизации конструктивных параметров элементов синхронных электрических машин с постоянными магнитами в составе генерирующих и приводных комплексов, учитывающих взаимное влияние кинематических, динамических, энергетических и тепловых характеристик синхронных электрических машин с постоянными магнитами, что позволяет осуществить подробную параметризацию геометрии синхронных электрических машин с постоянными магнитами для проработки различных конфигураций электрической машины;

5) создание конструкции синхронных электрических машин с постоянными магнитами с повышенными энергетическими характеристиками с учетом влияния динамических и тепловых процессов на основе разработанных алгоритмов и программ;

6) разработка экспериментального стенда для проведения исследований кинематических, динамических, энергетических и тепловых характеристик синхронных электрических машин с постоянными магнитами.

В рамках выполнения диссертационной работы соискатель непосредственно участвовал в формулировке целей и задач исследования, определении путей их решения, проведении

измерений, анализе результатов, постановке задач, поиске современных оптимизационных алгоритмов, анализе и обобщении полученных научных результатов, формировании выводов по работе.

3. Научная новизна исследований

В диссертационной работе получены следующие новые научные результаты:

1. Метод топологической оптимизации распределения материалов в индукторах и роторах синхронных электрических машин с постоянными магнитами на основе генетического алгоритма, что позволяет проектировать синхронные электрические машины с постоянными магнитами с новыми топологиями, и с применением новых композиционных материалов, обладающие более высокой энергоэффективностью и низкой стоимостью производства.

2. Комплексная математическая модель свободнопоршневого двигателя стандартного цикла Отто, позволяющая получать данные для последующего расчета энергетических характеристик и оптимизации синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с возбуждением от постоянных магнитов в составе автономного источника электроснабжения.

3. Методика расчета электромагнитной силы синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с возбуждением от постоянных магнитов через линейную токовую нагрузку и индукцию магнитного поля постоянных магнитов в виде ряда Фурье, что позволяет повысить качество алгоритма оптимизации электрической машины.

4. Тепловая модель синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с возбуждением от постоянных магнитов, которая позволяет определить конструкцию системы охлаждения, максимальную мощность электрической машины, влияющие на теплоотдачу параметры, и разработать меры по тепловой защите электрической машины.

5. Эквивалентная схема магнитной цепи синхронного электродвигателя с постоянными магнитами в составе станка-качалки нефти, которая позволяет аналитически определить требуемые параметры магнитной системы электродвигателя.

6. Комплекс имитационных моделей автономного источника электроснабжения на основе электрической машины возвратно-поступательного действия с возбуждением от постоянных магнитов, позволяющий проводить совместное моделирование тепловых, механических и электромагнитных процессов и выполнять многокритериальную оптимизацию конструкции электрической машины.

7. Методики оптимизации геометрии статора и индуктора электрической машины возвратно-поступательного действия с возбуждением от постоянных магнитов на основе генетического алгоритма по критерию достижения максимальной генерируемой мощности и намагничивающей силы.

8. Методика многокритериальной оптимизации геометрии ротора синхронного электрического двигателя с встроенными постоянными магнитами, которая позволяет получить множество допустимых решений и выбрать наиболее приемлемое решение с учетом требуемых параметров электрической машины.

Научная новизна исследований автора подтверждается публикаций статей в международных журналах, апробацией полученных результатов на научно-технических конференциях, 2 патентами на полезную модель, 7 свидетельствами на программы для ЭВМ.

4. Практическая значимость работы

Предложенные 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 с участием автора в качестве ведущего исполнителя 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 с участием автора в качестве ведущего исполнителя 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 с участием автора в качестве научного руководителя 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.

Среди наиболее практически важных решений можно отметить:

1. Экспериментальный образец синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия мощностью 3–11 кВт, с температурным рабочим диапазоном от 0 °С до 150 °С 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.

2. Программный комплекс, реализующий алгоритмы расчета термодинамических процессов в свободно-поршневом двигателе внутреннего сгорания, электромеханических процессов в синхронной электрической машине возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами, тепловых процессов в синхронной электрической машине 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 двигателем внутреннего сгорания на базе синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами.

3. Разработанная методика многокритериальной оптимизации конструктивных параметров ротора синхронного электрического двигателя с встроенными постоянными магнитами использована при создании опытных образцов синхронных электрических двигателей с постоянными магнитами на предприятии АО «Чебоксарский электроаппаратный завод».

5. Достоверность результатов исследований

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

6. Апробация работы и публикации по диссертации

По теме диссертации опубликовано 47 печатных работ в журналах и сборниках, в том числе 14 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 11 статей индексируемых в международных базах данных *Scopus* или/и *Web of Science*, 1 коллективная монография, также получено 2 патента на полезную модель, 7 свидетельств на программы для ЭВМ и 12 работ в сборниках материалов конференций.

7. Соответствие содержания диссертации паспорту научной специальности

Диссертация соответствует специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты. Полученные в работе научные результаты соответствуют пп. 2 «Разработка научных основ создания и совершенствования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов» (Разработана математическая модель работы автономного источника электроснабжения на базе свободнопоршневого двигателя и синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами. Разработана методика расчета электромагнитной силы 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. Разработана тепловая модель синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами., позволяющая определить конструкцию системы охлаждения), пп. 3 «Разработка методов анализа и синтеза преобразователей электрической и механической энергии» (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), пп. 5 «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» (Разработаны новые методики оптимизации конструктивных размеров статора и индуктора синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами. Предложена методика многокритериальной оптимизации конструктивных параметров ротора синхронного электрического двигателя с встроенными постоянными магнитами, разработан новый метод топологической оптимизации для распределения материалов в индукторах и роторах синхронных электрических машин с постоянными магнитами с использованием генетического алгоритма) Паспорта специальности.

8. Замечания по работе

В целом диссертационная работа Сафина Альфреда Робертовича заслуживает положительной оценки, однако по ней имеются следующие замечания:

1. Во введении диссертационной работы уместно было бы сделать классификацию электромеханических преобразователей с постоянными магнитами, которые подразделялись:

- по функциональному назначению (силовые, исполнительные, измерительные, преобразователи напряжения, частоты, тока);
- по типу движения (вращательное, линейное, колебательное, качения);
- по конструктивным особенностям подвижной части (цилиндрический, дуговой, плоскостной, торцевой, барабанный, конусный, шаровой).

2. В главе 2 диссертации предложены формулы для определения линейной нагрузки и индукции в виде рядов Фурье, однако выражение для определения силы на основе этих разложений не представлено, что не позволяет произвести оценку влияния на энергетические показатели наиболее значимых гармоник. Следовало бы также оценить индукцию полевыми методами для оценки точности расчета по схемам замещения.

3. Не рассмотрен продольный концевой эффект, поскольку магнитопровод линейной машины не замкнут. Концевой эффект вызывает пульсации электромагнитной силы, которые зависят от соотношения длин подвижной и неподвижной частей.

4. Автором при описании имитационного моделирования не представлена система дифференциальных уравнений синхронной машины возвратно-поступательного действия.

5. Среди параметров оптимизации на стр. 206 присутствует радиус ротора, однако не пояснено как при изменении этого параметра изменяется линейная токовая нагрузка машины и как это влияет на ее тепловой режим.

6. В диссертации отсутствуют модели для переходных процессов, возникающих при возвратно-поступательном движении индуктора.

7. При определении КПД не представлены формулы для расчета мгновенного или усреднённого за цикл КПД.

8. При исследовании тепловых процессов в тепловой модели не учтено влияние нагрева синхронной машины от двигателя внутреннего сгорания.

9. Из текста не вполне ясно при помощи какого программного обеспечения реализован генетический алгоритм.

Отмеченные недостатки носят уточняющий характер и, в целом, не влияют на положительную оценку диссертационной работы.

9. Заключение по работе

Вопросы, затронутые в диссертации, являются актуальными. Предложен новый подход по развитию методических и программных решений по проектированию и оптимизации конструктивных параметров синхронных машин.

Практическая реализация методических и программных решений может найти дальнейшее применение в следующих областях: производство высокоэффективных синхронных двигателей для привода станков-качалок нефти, погружных линейных двигателей для привода плунжерных насосов в малодебитных скважинах, производство синхронных генераторов с постоянными магнитами для альтернативных источников электроэнергии.

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.

Уровень и количество 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.

Диссертационная работа Сафина Альфреда Робертовича «Методы проектирования и создание синхронных электрических машин с постоянными магнитами в составе генерирующих и приводных комплексов», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты», является завершённой научно-квалификационной работой. Новые научные результаты, полученные соискателем, имеют существенное значение для развития области науки и техники, занимающейся исследованием физических и технических принципов создания и совершенствования силовых и информационных устройств для взаимного преобразования электрической и механической энергии и вносят значительный вклад в развитие страны. Работа

соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней, принятого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, а Сафин Альфред Робертович заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты».

Отзыв составлен по результатам обсуждения диссертационной работы Сафина Альфреда Робертовича на заседании кафедры электромеханики, электрических и электронных аппаратов НИУ «МЭИ» 28 ноября 2019 года (протокол заседания № 10/19).

Профессор кафедры электромеханики,
электрических и электронных аппаратов,
доктор технических наук, профессор

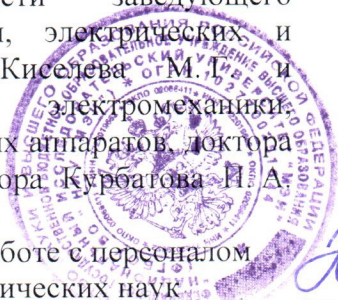
 /Курбатов Павел Александрович/

Исполняющий обязанности заведующего
кафедрой электромеханики, электрических и
электронных аппаратов Федерального
государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский университет
«МЭИ», кандидат технических наук

 /Киселев Михаил Геннадьевич/

Подпись кандидата технических наук,
исполняющего обязанности заведующего
кафедрой электромеханики, электрических и
электронных аппаратов Киселева М. Г. и
профессора кафедры электромеханики,
электрических и электронных аппаратов, доктора
технических наук, профессора Курбатова И. А.
удостоверяю:

Начальник управления по работе с персоналом
НИУ «МЭИ», кандидат технических наук



 /Савин Никита Георгиевич/

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Адрес: 111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная улица, дом 14

Телефон: +7 495 362-70-01, 7 495 362-75-60

E-mail: universe@mpei.ac.ru, сайт: <https://mpei.ru>.

5 марта 2020 г.

Сведения о лице, утвердившем отзыв ведущей организации на диссертацию:

Драгунов Виктор Карпович, проректор по научной работе,

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

доктор технических наук, профессор

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»: 111250, Россия,

г. Москва, Красноказарменная улица, дом 14, телефон: +7 495 362-77-22,

e-mail: DragunovVK@mpei.ru, сайт: <https://mpei.ru>.