

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.082.06,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ «КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ», МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ  
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 23 июня 2020 г., № 18

О присуждении Сафину Альфреду Робертовичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора технических наук.

Диссертация «Методы проектирования и создание синхронных электрических машин с постоянными магнитами в составе генерирующих и приводных комплексов» по специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты принята к защите 24 декабря 2019 г., протокол № 17 диссертационным советом Д 212.082.06, созданным на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования (ФГБОУ ВО) «Казанский государственный энергетический университет», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, приказ № 552/нк от 23.05.2018 г.

Соискатель Сафин Альфред Робертович, 1981 года рождения,  
диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук «Разработка энергосберегающих схем и алгоритмов управления тяговыми двигателями постоянного тока электроподвижного состава» защитил в 2009 году в диссертационном совете, созданном на базе ГОУ ВПО «Московский энергетический институт (технический университет)»,  
работает в должности доцента кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» в ФГБОУ ВО «Казанский государственный

энергетический университет», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный консультант – доктор технических наук Ившин Игорь Владимирович, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий», заведующий кафедрой.

Официальные оппоненты:

1. **Колпахчян Павел Григорьевич**, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», кафедра «Электрические машины и аппараты», заведующий кафедрой;

2. **Макаров Валерий Геннадьевич**, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», кафедра «Электропривод и электротехника», заведующий кафедрой;

3. **Шевченко Александр Федорович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», кафедра «Электромеханика», заведующий кафедрой;

дали **положительные** отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, в своем положительном отзыве, подписанном Курбатовым Павлом Александровичем, доктором технических наук, профессором кафедры «Электромеханика, электрические и электронные аппараты» и Киселевым Михаилом Геннадьевичем, кандидатом технических наук, исполняющим обязанности заведующего кафедрой «Электромеханика, электрические и электронные аппараты», **указала**, что 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: проектирование, исследование и разработка силовых электромеханических преобразователей энергии; 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 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».

Соискатель имеет 97 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 47 работ общим объёмом 16,82 печатных листа и авторским вкладом 8,15 печатных листа; работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе данных SCOPUS / Web Of Science – 11, объёмом 4,56 печатных листа и авторским вкладом 2,34 печатных листа; в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК по специальности диссертации 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты – 11, объёмом 4,5 печатных листа и авторским вкладом

2,29 печатных листа; в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК по другим специальностям – 3, общим объемом 1,63 печатных листа и авторским вкладом 1,2 печатных листа; свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ – 7, объемом 0,88 печатных листа и авторским вкладом 0,35 печатных листа; патентов на полезную модель – 2, объемом 0,5 печатных листа и авторским вкладом 0,2 печатных листа; работ, опубликованных в материалах и тезисах международных научных конференций – 12, общим объемом 3,25 печатных листа и авторским вкладом 1,35 печатных листа; монографий – 1, объемом 1,5 печатных листа и авторским вкладом 0,42 печатных листа.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Сафин, А.Р. Разработка метода проектирования линейных электрических машин возвратно-поступательного действия на основе топологической оптимизации / А. Р. Сафин, Р. Р. Хуснутдинов, А. М. Копылов, В. В. Максимов, А. Н. Цветков, Р. Р. Гибадуллин // **Электроника и электрооборудование транспорта.** – 2017. – № 5. – С. 34 – 39. – ISSN: 1812-6782. (Перечень рецензируемых научных журналов и изданий ВАК №1414 на дату публикации 10.2017). 6 с./3 с. (0,38 п.л./0,19 п.л.).

Содержит основные результаты, изложенные в четвертой и пятой главах диссертации.

2. Сафин, А.Р. Испытательный стенд с программно-аппаратным комплексом для исследования электрической машины возвратно-поступательного действия / Р. Р. Гибадуллин, А. Н. Цветков, А. Р. Сафин, А. М. Копылов, И. В. Ившин // **Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики.** – 2016. – № 3 – 4. – С. 105 – 111. – ISSN: 1998-9903. (Перечень рецензируемых научных журналов и изданий ВАК №1551 на дату публикации 04.2016). 7 с./3 с. (0,44 п.л./0,19 п.л.).

Содержит основные результаты, изложенные в шестой главе диссертации.

3. Сафин, А. Р. Выбор и оптимизация конструктивных параметров обратной электрической машины возвратно-поступательного движения / А.Р. Сафин, И. В. Ившин, А.М. Копылов, Е.И. Грачева, А.Н. Цветков // **Электроника и электрооборудование транспорта.** – 2017. – № 3. – С. 10 - 16. – ISSN: 1812-6782. (Перечень рецензируемых научных журналов и изданий ВАК №1416 на дату публикации 06.2017). 7 с./4 с. (0,44 п.л./0,25 п.л.).

Содержит основные результаты, изложенные во второй, четвертой и пятой главах диссертации.

4. Сафин, А.Р. Разработка электрической машины возвратно-поступательного действия модульного типа / А. М. Копылов, А. Р. Сафин, Р. Р. Гибадуллин, Л.В. Долomanюк, А. Н. Цветков // **Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики.** – 2016. – № 9–10. – С. 126 –132. – ISSN: 1998-9903. (Перечень рецензируемых научных журналов и изданий ВАК №1551 на дату публикации 10.2016). 7 с./4 с. (0,44 п.л./0,25 п.л.).

Содержит основные результаты, изложенные в первой и второй главах диссертации.

5. Сафин, А.Р. Разработка математической модели автономного источника электроснабжения с свободно-поршневым двигателем на базе синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами / А.Р. Сафин, И.В. Ившин, Т.И. Петров, Е.И. Грачева // **Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики.** –2019.–№ 6. – С. 38-48. – ISSN: 1998-9903. (Перечень рецензируемых научных журналов и изданий ВАК № 935 на дату публикации 12.2019). 7 с./3 с. (0,44 п.л./0,19 п.л.).

Содержит основные результаты, изложенные во второй главе диссертации.

6. Сафин, А.Р. Модель системы управления станком-качалкой на основе синхронных двигателей с бездатчиковым методом/ Т.И. Петров, А.Р. Сафин, И.В. Ившин, А.Н. Цветков, В.Ю. Корнилов // **Известия высших учебных**

заведений. **Проблемы энергетики.** –2018.–№ 7–8. – С. 107 – 116. – ISSN: 1998-9903. (Перечень рецензируемых научных журналов и изданий ВАК № 921 на дату публикации 06.2018). 10 с./5 с. (0,63 п.л./0,31п.л.).

Содержит основные результаты, изложенные в первой и четвертой главе диссертации.

7. Сафин, А.Р. Анализ развития электроприводов для станков-качалок нефти по результатам патентного поиска/ И.В. Ившин, А.Р. Сафин, Т.И. Петров, А.Н. Цветков, В.Ю. Корнилов, А.И. Мухаметшин // **Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики.** –2019.–№ 5. – С. 3 - 13. – ISSN: 1998-9903. (Перечень рецензируемых научных журналов и изданий ВАК № 935 на дату публикации 10.2019). 10 с./5 с. (0,63 п.л./0,31п.л.).

Содержит основные результаты, изложенные в первой и четвертой главе диссертации.

8. Сафин, А.Р. Разработка метода топологической оптимизации электрических машин на основе генетического алгоритма/ А.Р.Сафин, Р.Р. Хуснутдинов, А.М. Копылов, В.В. Максимов, А.Н. Цветков, Р.Р. Гибадуллин, Т.И. Петров // **Вестник Казанского государственного энергетического университета.** –2018. –№4 (40). –С. 77 – 85. – ISSN: 2072-6007. (Перечень рецензируемых научных журналов и изданий ВАК № 300 на дату публикации 09.2018). 9 с./4 с. (0,56 п.л./0,25 п.л.).

Содержит основные результаты, изложенные в первой, четвертой и пятой главах диссертации.

9. Safin, A. R. Assessment, calculation and choice of design data for reversible reciprocating electric machine / А.М. Kopylov, I.V. Ivshin, A.R. Safin, R. Sh. Misbakhov, R. R. Gibadullin // **International Journal of Applied Engineering Research.** – 2015. – № 10. – P. 31449 -31462. – ISSN: 0973-4562. (База данных Scopus на дату публикации 03.2015). 13 с./7 с. (0,81 п.л./0,44 п.л.).

Содержит основные результаты, изложенные в четвертой и пятой главах диссертации.

10. Safin, A.R. Selection and justification of design parameters for reversible

reciprocating electric machine / A.R. Safin, I.V. Ivshin, A.M. Kopylov, R. Sh. Misbakhov, A.N. Tsvetkov // **International Journal of Applied Engineering Research**. – 2015. – № 10. – P. 31427– 31440. – ISSN: 0973-4562. (База данных Scopus на дату публикации 03.2015). 14 с./7 с. (0,88 п.л./0,44 п.л.).

Содержит основные результаты, изложенные во второй, четвертой и пятой главах диссертации.

11. Safin, A. R. Optimization of reciprocating linear generator parameters / A. P. Reshetnikov, I. V. Ivshin, N. V. Denisova, A. R. Safin, R. Sh. Misbakhov, A. M. Kopylov // **International Journal of Applied Engineering Research**. – 2015. – № 10. – P. 31403–31414. – ISSN: 0973-4562. (База данных Scopus на дату публикации 03.2015). 12 с./5 с. (0,75 п.л./0,31 п.л.).

Содержит основные результаты, изложенные в пятой главе диссертации.

Авторский вклад соискателя состоит в его определяющем участии в получении результатов и подготовке публикаций.

На диссертацию и автореферат поступило **16** отзывов, все положительные. В **16** отзывах содержатся следующие замечания:

1) В отзыве доктора технических наук, профессора кафедры «Автоматизированный электропривод и мехатроника» ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (г. Магнитогорск), **Сарварова Анвара Сабулхановича** имеются замечания:

1. Отсутствует сравнительный анализ предложенных методов с альтернативными способами оптимизации электрических машин.
2. Не оценивается повышение энергоэффективности нефтедобычи при замене асинхронных двигателей синхронными.
3. Требуется пояснить, каковы предельные значения рабочих характеристик – частоты перемещения индуктора, максимальной мощности, усилия на штоке индуктора - синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами.

2) В отзыве доктора технических наук, профессора кафедры «Системы электроснабжения» ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный

университет путей сообщения» (г. Хабаровск), **Ли Валерия Николаевича** имеются замечания:

1. В пояснениях к рисунку 3 автореферата не указано к чему относятся области 1,3,4,6,7,9, 10-15 (стр.17).

2. Из текста автореферата не понятно как определяется целое число  $N_{min}$ , необходимое для оценки области, занимаемой кластером, и последующей очистки (стр. 27).

3. Необходимо пояснить, на основе каких данных получен вывод о необходимости применения постоянного магнита на основе неодим – железо-бора в синхронных электрических машинах.

3) В отзыве доктора технических наук, профессора кафедры «Энергетика и энергоэффективность горных предприятий» Национальный исследовательский технологический университет МИСиС (г. Москва), **Бабочкина Геннадия Ивановича** имеются замечания:

1. Следовало бы представить допущения, при которых получены уравнения (3) и (4) для линейной токовой нагрузки и магнитной индукции в воздушном зазоре.

2. Не представлена информация об удельных энергетических показателях разработанного СДПМ и преимуществах его применения для привода станков-качалок по сравнению с традиционными электроприводами.

3. Не учтено влияние системы охлаждения СДПМ на КПД электродвигателя.

4) В отзыве доктора технических наук, профессора кафедры «Системы автоматизированного проектирования» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева-КАИ» (г. Казань), **Гизатуллина Зиннура Марселевича** имеются замечания:

1. В тексте автореферата не показано, исследуется ли работа генератора на активно-индуктивную нагрузку (выражение 6, стр.25) и является ли принятое значение  $\cos \varphi \approx 0,9$  фиксированной величиной для данного уравнения.



2. Требуется пояснить вид графиков на рисунке 16 (стр.31) – резкий спад кривых, показывающих снижение температуры внутри линейного генератора через 2500 сек. после начала работы.

5) В отзыве доктора технических наук, профессора кафедры «Электроснабжение» Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О.Сухого» (Республика Беларусь, г. Гомель),

**Надежды Владимировны Грунтович** имеются замечания:

1. На стр. 25 для выражения 6 не приведены граничные условия.

2. В автореферате не показано, какой тип магнитов выбран в результате оптимизации (глава 5).

6) В отзыве доктора технических наук, профессора кафедры «Электрооборудование судов и автоматизация производства» ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет» (г. Керчь), **Доровского Владимира Алексеевича** и кандидата технических наук, доцента кафедры «Электрооборудование судов и автоматизация производства» **Савенко Александра Евгеньевича** содержатся замечания:

1. В автореферате не представлена информация о технологии изготовления экспериментального образца синхронной электрической машине с постоянными магнитами возвратно-поступательного действия.

2. В автореферате не указаны затраты времени на вычисления оптимальной топологии роторов и индукторов предложенным методом.

7) В отзыве доктора технических наук, профессора кафедры «Электропривод и электрический транспорт» ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (г. Иркутск), **Дунаева Михаила Павловича** имеются замечания:

1. В тексте автореферата отсутствует пояснение, каким образом функционируют блок нагрева и система охлаждения в составе испытательного стенда для проведения исследований рабочих характеристик линейной электрической машины.

2. Какие вычислительные мощности необходимы для проведения

оптимизационных расчетов синхронных электрических машин?

3. Каким образом рассчитывается КПД линейной машины?

8) В отзыве доктора технических наук, профессора кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» (г. Самара), **Зубкова Юрия Валентиновича** имеются замечания:

1. Рисунки 1,2,4,9 в печатном варианте автореферата не читаемы, ввиду чего отсутствует возможность восприятия значительной части работы.

2. В пункте 4 научной новизны заявлена эквивалентная схема магнитной цепи СД в составе станка – качалки нефти. Что нового в этой схеме по сравнению с известными схемами замещения машин с магнитоэлектрическим возбуждением, и имеются ли какие – либо элементы в ней, указывающие на принадлежность именно к СД для станка-качалки?

3. Стр. 19. «...рис.5 показывает изменение индукции постоянных магнитов? на высоте радиуса зазора. Во – первых, трудно понять , о чем идет речь. Во-вторых, на каком основании автор делает по виду этой зависимости вывод о необходимости работы ЭМВПД (в тексте нет расшифровки этой аббревиатуры) с ПМ на выпрямительную нагрузку с последующим аккумулярованием?

4. Чем обоснован выбор намагничивающей силы в качестве критерия оптимизации конструктивных параметров ЭМВПД с ПМ? Вывод о том, что увеличение ширины зубца снижает насыщение материала зубца, тривиален.

9) В отзыве доктора технических наук, профессора, ректора ФГАОУ ДПО «Петербургский энергетический институт повышения квалификации» (г. Санкт-Петербург), **Назарычева Александра Николаевича** имеются замечания:

1. Для определения эффективного способа реализации тепловой защиты синхронной машины необходимо уточнить, какие параметры, влияющие

на теплоотдачу, следует оптимизировать.

2. Автором проведены расчеты КПД в режиме генератора (рис.15), следует пояснить, возможно ли производить моделирование и выполнять расчет КПД для разработанных моделей в режиме двигателя?

3. Не указан диапазон мощностей синхронных машин возвратно-поступательного действия, которые возможно моделировать при помощи разработанного программного комплекса.

10) В отзыве доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой «Электрооборудование» ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет» (г. Вологда), **Немировского Александра Емельяновича** имеются замечания:

1. Чем ограничены пределы выдаваемой электрической мощности и частоты перемещения индуктора при работе линейной электрической машины в режиме генератора для определения КПД (рис. 13)?

2. Какие наиболее значимые факторы, параметры должны учитываться при определении оптимального КПД синхронной линейной машины?

11) В отзыве доктора технических наук, декана «Энергетического факультета», профессора кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (г. Барнаул), **Полищука Владимира Иосифовича** имеются замечания:

1. Из автореферата неясно как оценивается погрешность вычислений электромагнитной силы, согласно разработанному алгоритму оптимизации параметров синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами (рис.8).

2. В тексте автореферата требует пояснения выражение – «при разработке алгоритмов численного моделирования синхронной ЭМВПД с ПМ в основу ставилась глубокая параметризация геометрии индуктора и статора» (стр. 22).

12) В отзыве доктора технических наук, доцента, заведующего кафедрой

«Электрические станции» ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» (г. Новосибирск), **Русиной Анастасии Георгиевны** имеются замечания:

1. Требуется обоснование выбора генетических алгоритмов для оптимизации конструктивных параметров синхронных электрических машин.

2. В автореферате не указаны характеристики испытательного стенда для проведения углубленных исследований образца синхронной электрической машине возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами.

3. В автореферате не представлена методика расчета КПД синхронной электрической машине возвратно-поступательного действия.

13) В отзыве доктора технических наук, доцента, профессора кафедры «Фундаментальных и естественных наук» Филиала МГУ имени М.В. Ломоносова (Республика Таджикистан, г. Душанбе), **Сафарова Махмадали Махмадиевича** имеются замечания:

1. В работе недостаточное внимание уделяется обсуждению возможных математических описаний, полученных экспериментальных данных на испытательном стенде.

2. Исходя из автореферата, трудно сделать вывод об алгоритме проведения испытаний линейной электрической машины.

14) В отзыве доктора технических наук, профессора, Учёного секретаря НТС, начальника отдела НТС и НТИ Акционерного общества «Научно-технический центр Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы» (г. Москва), **Хренникова Александра Юрьевича** имеются замечания:

1. В тексте автореферата (стр.19) отсутствует имитационная модель генерирующего комплекса на базе синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия.

2. Не показано, каким образом учитываются переходные процессы в

линейной машине при расчете энергетических характеристик (рис.13, 14).

15) В отзыве доктора технических наук, профессора кафедры «Электрооборудование» ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» (г. Липецк), **Шпигановича Александра Николаевича** и доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой «Электрооборудование» **Зацепиной Виолетты Иосифовны** имеются замечания:

1. Из текста автореферата не понятно, почему при разработке новых методик оптимизации конструктивных размеров статора и индуктора синхронной ЭМВПД с ПМ по критерию максимума намагничивающей силы и максимальной генерируемой мощности, а также нового метода топологической оптимизации для распределения материалов в индукторах и роторах СЭМПМ использовался генетический алгоритм. Насколько целесообразно его применение в рассматриваемых задачах?

2. Текстовая информация, представленная на рисунках 1 и 2, а также обозначения элементов эквивалентной схемы на рисунке 4 плохо читаемы.

16) В отзыве доктора экономических наук, профессора кафедры «Отраслевая экономика» Политехнический институт Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими (Республика Таджикистан, г. Душанбе), **Авезова Азизулло Хабибовича** имеются замечания:

1. Не определен и поэтому не совсем понятен термин «кластер» - стр. 26.

2. Как учитывалось притяжение постоянных магнитов на распределение нагрузок на элементы индуктора синхронной линейной электрической машины при проведении прочностных расчетов.

3. На рисунке 11 представлен аппаратный состав испытательного стенда, однако не представлена краткая информация о назначении и функциях, выполняемых отдельными блоками данного стенда.

**Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается** их известностью своими достижениями в данной отрасли науки, наличием публикаций в соответствующей сфере исследований и способностью определить научную и практическую ценность диссертации.

Официальный оппонент Макаров Валерий Геннадьевич, доктор технических наук, является крупным специалистом в области моделирования

электрических машин; официальный оппонент Колпахчян Павел Григорьевич, доктор технических наук, является крупным специалистом в области управления синхронными тяговыми двигателями с постоянными магнитами и проектирования линейных электрических машин; официальный оппонент Шевченко Александр Федорович, доктор технических наук, является известным специалистом в области синхронных машин с постоянными магнитами.

Ведущая организация, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», является общепризнанным лидером российской высшей школы по направлению подготовки специалистов в области проектирования и эксплуатации электрических машин.

Все оппоненты и представители ведущей организации имеют публикации, соответствующие теме диссертации Сафина А.Р.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

**разработана** математическая модель работы свободнопоршневого двигателя с учетом диаметра цилиндров, массы поршневой группы и индуктора, степени сжатия, хода поршня, теплоты сгорания топлива и сил сопротивления, позволяющая определить положение и скорость индуктора синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами в составе автономного источника электроснабжения с целью расчета её энергетических характеристик;

**разработана** методика определения электромагнитной силы синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами на основании уравнений линейной токовой нагрузки и результирующего значения индукции магнитного поля в воздушном зазоре, в виде ряда Фурье, отличающаяся тем, что дополнительно позволяет провести расчет и оптимизацию ширины воздушного зазора, ширины и высоты паза

статора, ширины зубца статора, ширины ярма статора, ширины ярма индуктора, высоты магнита электрической машины возвратно-поступательного действия;

**разработана** тепловая модель, основанная на разбиении поперечного сечения синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами на области, относящиеся к катушке с обмоткой, индуктору, каналу охлаждения, кожуху охлаждения, пакету статора, что позволяет определить уравнения теплопроводности между указанными областями в радиальном и аксиальном направлениях;

**разработаны** усовершенствованные 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 с разработкой программного комплекса, позволяющего учитывать термодинамические процессы в свободнопоршневом двигателе, электромеханические процессы и динамические нагрузки на подвижные элементы в синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами при реализации алгоритмов оптимизации;

**разработана** методика многокритериальной оптимизации конструктивных параметров ротора синхронного электрического двигателя с встроенными постоянными магнитами, позволяющая максимизировать номинальный момент и минимизировать массу магнитов при выполнении ограничений на максимально возможный момент и предельное значение тока статора, при котором обеспечивается устойчивость к размагничиванию в составе штанговой скважинной насосной установки;

**разработан** метод топологической оптимизации для распределения материалов и определения направления намагниченности постоянных магнитов в индукторах с использованием генетического алгоритма, что позволяет проектировать новые топологии индукторов, повышающие энергоэффективность синхронных электрических машин возвратно-

поступательного действия с постоянными магнитами;

**разработан** экспериментальный образец синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами с использованием разработанных алгоритмов проектирования и оптимизации, имеющий модульную конструкцию и предназначенный для генерации электрической энергии и привода механизмов при тяжелых условиях эксплуатации в составе автономных объектов;

**доказана** достоверность результатов моделирования на основе сопоставлений с экспериментальными данными, полученными на испытательном стенде для проведения исследований экспериментального образца синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

**доказаны** положения, определяющие методы и алгоритмы проектирования синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами с учетом термодинамических процессов в свободнопоршневом двигателе, высоких переменных динамических нагрузок, необходимости учета высших гармонических составляющих при расчете КПД машины вследствие линейного перемещения индуктора в составе автономной энергоустановки и синхронного электрического двигателя с встроенными постоянными магнитами для привода штанговой скважинной насосной установки;

**применительно к проблематике диссертации результативно использован (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов)** комплекс существующих базовых методов теории электротехники, теории электрических машин, теории теплотехники, теории оптимизации, в том числе численные методы исследования и метод конечно-элементного анализа;

**изучено** влияние конструктивных параметров статора и индуктора, топологий индуктора синхронной электрической машины возвратно-



поступательного действия с постоянными магнитами на развиваемую электромагнитную силу и конструктивных параметров ротора синхронной электрической машины с встроенными магнитами на развиваемый вращающий момент.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики** подтверждается тем, что:

**разработаны и внедрены** (имеются акты внедрения): методы и алгоритмы расчета параметров синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами и конструкторская документация для испытательного стенда 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», внедрены в производственный процесс ЗАО «МПОТК «Технокомплект»;

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 «Чебоксарский электроаппаратный завод», внедрена в работу проектных отделов 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;

алгоритмы и программы для оптимизации конструктивных параметров статора и индуктора синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» (г. Казань) по направлению подготовки бакалавров 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» и магистров по направлению 13.03.04 «Электроэнергетика и электротехника». Использование указанных результатов позволило повысить качество образовательного процесса;

**определены** оптимальные конструктивные параметры статора и индуктора синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами мощностью до 10 кВт для достижения КПД равного 0,8, оптимальные конструктивные параметры ротора синхронной электрической машины с постоянными магнитами мощностью 15 кВт для достижения момента 200 Н·м;

**создан** комплекс имитационных моделей автономного источника электроснабжения на базе синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами, который позволяет на этапе проектирования учитывать конструктивные параметры электрической машины и приводного свободнопоршневого двигателя;

**создан** экспериментальный образец электрической машины возвратно-поступательного действия в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-

технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы», соглашение о предоставлении субсидии от 20 октября 2014 г. № 14.577.21.0121 на основе алгоритмов и программ для оптимизации конструктивных параметров статора и индуктора синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами;

**создан** опытный образец синхронного двигателя 11 ДВМ160 рассчитанный по предложенным методикам при проектировании станций управления для станков качалок нефти совместно с АО «ЧЭАЗ» в рамках договора № ДР-936/17 от 26 октября 2017 года.

**Оценка достоверности результатов исследований выявила:**

**для экспериментальных работ** результаты получены на сертифицированном измерительном оборудовании ведущих мировых производителей, особенностью испытательного стенда является энергетическая установка, которая снабжена гидравлическим двигателем при испытании синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами в режиме генератора и блоком нагрева, которые имитируют работу свободнопоршневого двигателя и обеспечивают синусоидальный закон движения индуктора, что позволяет получить корректные результаты КПД и выдаваемой электрической мощности при различных ходах индуктора;

**теория** построена на известных положениях электротехники, электрических машин, теплотехники, математическом аппарате оптимизационных задач, согласуется с известными из литературы данными и с опубликованными теоретическими и экспериментальными работами других авторов;

**идея базируется** на учете термодинамических процессов в свободнопоршневом двигателе и высоких переменных динамических нагрузок вследствие линейного перемещения индуктора синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами в разработанном программном комплексе и верификации результатов

моделирования при экспериментальных исследованиях экспериментального образца синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными;

**использовано** сравнение авторских данных, полученных на испытательном стенде, предназначенном для исследования работы экспериментального образца синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами при механическом и температурном воздействии, с данными полученными другими исследователями по рассматриваемой и смежной тематикам;

**установлено** количественное совпадение полученных при математическом моделировании результатов расчета коэффициента полезного действия и значений температур в корпусе синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами с результатами, полученными при экспериментальных исследованиях;

**использованы** современные методики экспериментальных исследований, сбора и обработки получаемых данных на базе известных программных продуктов Matlab-Simulink, CATIAV5, Comsol Multiphysics.

**Личный вклад соискателя** состоит в непосредственном участии на всех этапах получения результатов, которые представлены в диссертации и отражены в публикациях при участии соискателя. Соискателем совместно с научным консультантом поставлены цель и задачи исследования. Сформулированы научная проблема и математические модели генерирующего и приводного комплекса на базе синхронных электрических машин с постоянными магнитами. Разработаны имитационные модели генерирующего комплекса на базе электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами, учитывающие конструктивные параметры электрической машины. Разработана методика оптимизации конструктивных размеров статора и индуктора электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами по критерию максимальной генерируемой мощности. Разработана методика оптимизации

конструктивных размеров статора и ротора синхронного электрического двигателя с постоянными магнитами по критерию максимального номинального момента и минимальной массы магнитов. Совместно с научным коллективом по грантам РФФИ № 17-48-160438 и № 18-48-160023 разработан метод топологической оптимизации синхронных электрических машин с постоянными магнитами для распределения материалов в роторах и индукторах с использованием генетического алгоритма. Предложена концепция объединения материалов в кластеры и процедура получения однородной структуры кластеров. Сформулированы алгоритмы для программного комплекса по оптимизации конструктивных параметров синхронных электрических машин с постоянными магнитами. Соискателем проведены экспериментальные исследования на разработанном испытательном стенде для изучения характеристик синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами при механическом и температурном воздействии.

Диссертационный совет рекомендует использовать результаты диссертационного исследования Сафина А.Р. в научно-исследовательских институтах и лабораториях, проектных организациях занимающихся исследованием, разработкой и применением силовых электромеханических преобразователей энергии, в научно-образовательном процессе в профильных высших учебных заведениях, а также на предприятиях занимающихся производством и эксплуатацией электрических генераторов и двигателей. Полученные в работе результаты могут быть использованы в НИУ «МЭИ» (г. Москва), НИУ «МАИ» (г. Москва), СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (г. Санкт-Петербург), ФГБОУ ВО «НГТУ» (г. Новосибирск), ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова» (г. Чебоксары), ФГБОУ ВО КНИТУ-КАИ (г. Казань), ФГУП «ВЭИ» (г. Москва) ЗАО «МПОТК «Технокомплект» (г. Дубна), АО «ЧЭАЗ» (г. Чебоксары), ООО «Техмаш-Энерго» (г. Екатеринбург), ГК «ЭнергоПроф» (г. Казань) и в других организациях.

Диссертация Сафина А.Р. «Методы проектирования и создание

синхронных электрических машин с постоянными магнитами в составе генерирующих и приводных комплексов» соответствует критериям п. 9 – 14 Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, в которой содержится решение научной проблемы повышения энергетической эффективности синхронных электрических машин с постоянными магнитами. Решение данной научной проблемы имеет значение для развития области знаний об электрических машинах, занимающейся проектированием и созданием электромеханических линейных и вращающихся преобразователей. Внедрение предложенных решений вносит значительный вклад в развитие страны.

На заседании 23 июня 2020 года, протокол № 18, диссертационный совет принял решение присудить Сафину А.Р. ученую степень доктора технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 20 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 16, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель

диссертационного совета

Ваньков Юрий Витальевич

Ученый секретарь

диссертационного совета

Зиганшин Шамиль Гаязович

25 июня 2020 г.