

На правах рукописи



Копылов Андрей Михайлович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ СИНХРОННОЙ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО
ДЕЙСТВИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА**

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2018

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», на кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Сафин Альфред Робертович

Официальные оппоненты: Макаров Валерий Геннадьевич
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Казанский национальный
исследовательский технологический университет»,
заведующий кафедрой электропривода и
электротехники

Нурбосынов Дуйсен Нурмухамедович,
доктор технических наук, профессор,
ГБОУ ВО «Альметьевский государственный
нефтяной институт», заведующий кафедрой электро-
и теплоэнергетики

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
университет «МЭИ», г. Москва

Защита состоится 12 марта 2019 года в 14 ч 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.082.06, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, ауд. Д-225, тел./факс (843) 519-42-55.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, с указанием контактных данных и заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, КГЭУ, Ученому секретарю диссертационного совета Д 212.082.06.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Казанского государственного энергетического университета и на официальном сайте КГЭУ <https://kgeu.ru/Diss/Dissertant/273?idDiss=79>

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ш.Г. Зиганшин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

В настоящее время подавляющая часть электрической энергии в Российской Федерации вырабатывается на крупных электростанциях и распространяется по электрическим сетям общего пользования. Тем не менее, по разным оценкам, 60 – 70% территории России не охвачены централизованным электроснабжением. На этой территории проживает более 20 млн. человек и жизнедеятельность людей обеспечивается главным образом средствами малой и микро- энергетики.

Традиционно измеренные потери при передаче электроэнергетики составляют 12 – 18% на одну линию электропередачи и трансформаторную подстанцию. Энергетическая эффективность использования первичного топлива (природного газа) в централизованных схемах составляет 10 – 20%, а ремонты и техническое обслуживание требуют трудозатрат 6,7 человека на один мегаватт суммарной энергии (электрическая и тепловая энергия) в электрогенерирующих и электросетевых компаниях, а также 60 – 90 человек на один мегаватт в коммунальном секторе.

При этом прокладка линий электропередачи при подключении новых потребителей к электросетям сегодня является одним из главных сдерживающих факторов к появлению новых независимых производств.

Энергетическая стратегия России на период до 2030 года определила развитие малой энергетики в качестве одного из ключевых направлений развития энергетического сектора. В стране уже сегодня функционируют порядка 50 тысяч объектов малой распределенной генерации. Однако в ближайшие 7 – 10 лет поставлена задача в несколько раз увеличить их суммарную установленную мощность, которая в настоящее время составляет 12 ГВт, и увеличить на них производство электроэнергии (сейчас – 24 млрд кВт.ч) с целью еще более надежного электроснабжения потребителей (по официальным данным Министерства энергетики Российской Федерации).

В настоящее время широкое распространение получают энергоустановки малой и микро- энергетики с энергетическими модулями мощностью до 100 кВт на основе двигателей внутреннего сгорания (ДВС).

В этих установках для генерации электроэнергии за счет преобразования механической энергии движения поршней ДВС оптимально использовать линейные электрические машины возвратно-поступательного действия (ЭМВПД).

Задачи конструирования, испытания и исследования ЭМВПД рассмотрены в работах М.Я. Хитерера, И.Е. Овчинникова, А.И. Москвитина, М.М. Соколова, Л.К. Сорокина, Е.В. Козаченко, И.В. Черных, Ф.Н. Сарпулова, Р.Т. Шрейнера,

Л.В. Клименко, Ю.Ф. Антонова, А.А. Зайцева, Е.В. Сергеевской, F. Milanesi, N. Bianchi, S. Bolognani, H. Polinder и других. Однако большинство методов, рассмотренных в работах вышеперечисленных авторов, ограничено оптимизацией нескольких параметров, определяющих форму отдельных элементов конструкции ЭМВПД.

Таким образом, исследование и поиск перспективных конструкций, проработка и выбор оптимальных конструктивных решений для ЭМВПД, топологическое совершенствование конструкции электрической машины в заданном пространстве являются актуальной научной задачей.

Объект исследования: синхронная электрическая машина возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами (ПМ).

Предмет исследования: параметры основных конструктивных частей: статора и индуктора синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами.

Целью работы является повышение КПД синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами за счёт увеличения электромагнитной мощности путем совершенствования конструкции статора и индуктора.

Для достижения цели поставлены и решены следующие **задачи:**

- 1) проанализировать основные направления создания электромеханических линейных преобразователей на основе ЭМВПД;
- 2) разработать имитационную модель для анализа электромагнитных процессов с учетом конструктивных параметров синхронной ЭМВПД с ПМ;
- 3) разработать алгоритмы и программы для совершенствования конструкции статора, индуктора, элементов магнитной цепи синхронной ЭМВПД с ПМ с целью повышения её КПД;
- 4) создать конструкцию синхронной ЭМВПД с ПМ с повышенным КПД при заданных условиях на основе разработанных алгоритмов и программ;
- 5) провести экспериментальные исследования выходных характеристик синхронной ЭМВПД с ПМ.

Научная новизна работы заключается в следующем.

1. Разработана имитационная модель синхронной ЭМВПД с ПМ, учитывающая конструктивные параметры электрической машины, а также усилия на вал индуктора и длину его хода.

2. Разработаны алгоритмы и программы для оптимизации конструктивных параметров статора и индуктора синхронной ЭМВПД с ПМ. Критерием оптимизации является КПД при заданных условиях.

3. Разработан генетический алгоритм для топологической оптимизации индуктора синхронной ЭМВПД с ПМ.

Теоретическая значимость результатов работы состоит в развитии методов повышения энергетической эффективности электромеханических линейных преобразователей при заданных условиях с применением генетического алгоритма.

Практическая значимость результатов работы состоит в повышении качества проектирования электромеханических линейных преобразователей. Разработана конструкторская документация и изготовлен экспериментальный образец электрической машины возвратно-поступательного действия в рамках реализации 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, уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57714X0121.

Методология и методы диссертационного исследования опирались на положения теории электромеханических линейных преобразователей, теории электрических цепей. Исследования и расчеты выполнялись на ПЭВМ с использованием разработанных алгоритмов и программ. Применялись среды *Matlab*, *Visual Basic*, *AnsysMaxwell* и *CatiaV5*.

Положения, выносимые на защиту

1. Имитационная модель синхронной ЭМВПД с ПМ, учитывающая конструктивные параметры электрической машины, а также усилия на вал индуктора и длину его хода.

2. Алгоритмы и программы для повышения КПД синхронной ЭМВПД с ПМ путем оптимизации конструктивных параметров статора и индуктора.

3. Генетический алгоритм для топологической оптимизации индуктора синхронной ЭМВПД с ПМ, позволяющий получить максимальную электромагнитную силу при заданных условиях.

Обоснованность и достоверность выводов и результатов работы достигается корректным использованием при решении поставленных задач математических методов, экспериментальной обоснованностью принятых допущений, сопоставлением результатов с общеизвестными, опубликованными в научно-технической литературе исследованиями.

Апробация работы

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на научно-технической конференции инновационных проектов, выполненных

вузами и научными организациями Приволжского федерального округа (г. Нижний Новгород, 2014), Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика и энергосбережение: теория и практика» (г. Кемерово, 2014), Поволжской научно-практической конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве» (г. Казань, 2015), международной научной конференции молодых ученых «Электротехника. Электротехнология. Энергетика – ЭЭЭ-2015» (г. Новосибирск, 2015), международной молодежной научной конференции «Научному прогрессу – творчество молодых» (г. Йошкар-Ола, 2015), международном симпозиуме «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение» (г. Казань, 2015), международной научно-практической конференции «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли» (г. Альметьевск, 2016), научно-технической конференции по итогам совместного конкурса фундаментальных исследований РФФИ-РТ (г. Казань, 2017).

Внедрение

Полученные теоретические и практические результаты работы использованы:

- в экспериментальном образце ЭМВПД, разработанном в рамках соглашения с Минобрнауки РФ от «20» октября 2014 г. № 14.577.21.0121. Уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) *RFMEFI57714X0121*;

- при разработке нового метода проектирования и программно-аппаратного комплекса для повышения энергоэффективности и надежности линейных электрических машин возвратно-поступательного действия по гранту Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) совместно с Правительством Республики Татарстан, в рамках соглашения № 216/647-С, проект № 17-48-160438, 2017 г;

- в процессе проектирования ООО «СреднеВолжскСельЭлектроСетьСтрой»;
- в учебном процессе кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «КГЭУ» при подготовке магистров по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Публикации

Основное содержание диссертации изложено в 14 печатных работах, из них 2 статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международной базе данных SCOPUS/Web Of Science, 4 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК (в том числе 2 статьи в журнале, входящем в перечень ВАК по

специальности диссертации), 5 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ и 3 публикации в материалах всероссийских и международных научных конференций.

Личный вклад автора

Результаты, представленные в диссертации и отраженные в публикациях, получены при непосредственном участии соискателя. Автор принимал участие в разработке математической модели ЭМВПД, разработке методики выбора конструктивных параметров ЭМВПД в режиме генератора и двигателя, создании генетического алгоритма для топологической оптимизации индуктора ЭМВПД, обработке расчетных и экспериментальных данных.

Соответствие диссертации 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», 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» Паспорта специальности.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 103 наименования, и 10 приложений. Содержит 148 страниц машинописного текста, 64 рисунка и 12 таблиц.

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю Сафину Альфреду Робертовичу за полезные консультации в ходе выполнения работы, а также заведующему кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета Ившину Игорю Владимировичу за помощь и поддержку.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, выявлена степень разработанности, сформулированы цель, решаемые задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методы исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту, обоснованность и достоверность выводов и результатов, апробация, внедрение и структура работы.

В первой главе проведен обзор основных тенденций и направлений развития разработки и создания ЭМВПД, который показал актуальность разработки мобильных и стационарных энергоустановок мощностью до 100 кВт на базе двигателей внутреннего сгорания, которые производят электроэнергию для сверхмалых одиночных потребителей. В качестве электромеханического преобразователя энергии в таких энергоустановках оптимально использовать ЭМВПД.

Приведена классификация конструкций ЭМВПД. Из различных видов цилиндрических ЭМВПД целесообразно выделить машины с постоянными магнитами, которые характеризуются наиболее высокими удельными показателями, позволяют резко уменьшить массу системы возбуждения и получить электрическую машину бесконтактного типа

Анализ математических моделей обратимых ЭМВПД показывает целесообразность применения методов расчета на основе теории поля, так как такие математические модели учитывают специфику геометрии линейного генератора и насыщение участков магнитопровода.

Во второй главе произведено обоснование выбора конструкции разрабатываемой ЭМВПД с ПМ, активных частей статора и индуктора, рассмотрены вопросы механических и электромагнитных процессов в ЭМВПД с ПМ.

При сравнении силовых и удельных характеристик линейных синхронных машин было выявлено, что при равных объемах активного пространства машина с высокоэнергетическими подвижными редкоземельными магнитами по сравнению с машиной с подвижной обмоткой возбуждения существенно выигрывает по величине осевой силы, развиваемой на единицу объема и единицу массы, и по удельной мощности.

Преимущественной является реализация подвижной магнитной системы из кольцевых постоянных магнитах с осевой намагниченностью в виде Холбах-массива с циклически изменяемой угловой ориентацией вектора намагниченности. При этом, во-первых, в идеальном случае вектор намагниченности синусоидально изменяется в пространстве, что приводит к минимизации пульсации межзубцового сцепления без применения специальных мер в виде скашивания пазов, а во-вторых, магнитные потоки замыкаются внутри электрической машины, не рассеиваясь снаружи – эффект самоэкранирования.

Для изготовления постоянных магнитов индуктора производится выбор сплава *Nd-Fe-B*, как наиболее термоустойчивого и относительно недорогого материала.

Как наиболее перспективная принята следующая концепция: ЭМВПД с обмоткой на статоре и постоянными магнитами на цилиндрическом полумесяце индуктора, что позволит повысить эффективность использования пространства и в большей степени добиться унификации и стандартизации деталей электрической машины.

Третья глава посвящена расчету и исследованию конструктивных параметров и характеристик синхронной ЭМВПД с ПМ.

На основе математической модели ЭМВПД разработана имитационная модель трехфазной линейной синхронной ЭМВПД с ПМ, проведены расчеты зависимостей вырабатываемой электрической мощности и механической нагрузки на индуктор от частоты перемещения индуктора электрической машины.

Прочностной анализ крепления магнита на индукторе электрической машины показывает, что максимальное механическое напряжение на крепления составляет 7,72 МПа, что необходимо учитывать при выборе способа монтажа магнитов на основу индуктора.

Для основы индуктора из встроенной библиотеки выбран материал – титан, материал магнитов – *NdFeB* (Неодим-железо-бор). Масса индуктора, вычисленного в САПР *CatiaV5*, составляет 5,2 кг, в аналогичных работах масса индуктора порядка 10 кг. С целью повышения прочности и надежности крепления магнитов предложена фиксация магнитов на индукторе с помощью банджа из стекловолокна толщиной 1 мм

Разработана программа для реализации параллельно-последовательных алгоритмов моделирования электрической машины возвратно-поступательного действия.

Проведена оптимизация параметров синхронной ЭМВПД с ПМ с применением специально разработанных оригинальных программ, критерием которой является максимальный КПД при заданных условиях (при фиксированных размерах статора и индуктора).

Параметры моделирования в программном комплексе *Matlab-Simulink* на основе программ, написанных на языке *Matlab*, передаются в проектную таблицу *Excel*, которая синхронизируется с системой автоматизированного проектирования (САПР) *CatiaV5*. В *CatiaV5* строится 3D модель ЭМВПД для проведения прочностного анализа (рисунок 1).

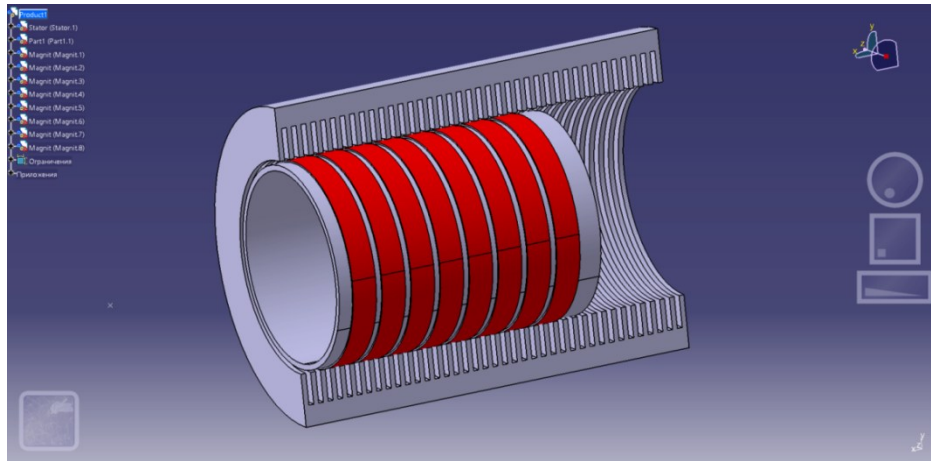


Рисунок 1 - 3D-модель линейного генератора

Разработан генетический алгоритм для топологической оптимизации индуктора электрической машины возвратно-поступательного действия.

В предлагаемом алгоритме область проектирования разделяется на сеть ячеек конечных элементов, с присущим каждой ячейке материалом. В данном случае рассматривается шесть типов материалов: воздух, титан и четыре разновидности магнита с различной намагниченностью, которые обозначены 0, 1, 2, 3, 4, 5 соответственно. Два начальных образца выбираются случайным образом. Далее выбираются несколько ячеек для обмена посредством однородного скрещивания и в результате создаются два новых образца. Новые образцы наследуют лучшие характеристики предыдущих образцов, затем процесс повторяется.

Оценка образцов производится по наибольшему значению целевой функции, представляющей собой результат расчета модуля интегральной электромагнитной силы, воздействующей на индуктор по горизонтальной оси X. Расчет выполняется в среде моделирования электромагнитных полей методом конечных элементов для задач магнитостатики.

В результате топологической оптимизации индуктора сделан вывод, что максимальная электромагнитная сила при заданных условиях достигается, когда магниты представляют собой полученную в результате моделирования модифицированную сборку Холбаха.

С учетом минимизации массы индуктора оптимальная толщина магнитных колец в модифицированной сборке Холбаха составляет 3 – 6 мм. При такой толщине достигается максимальная электромагнитная сила, действующая на интегральный контур индуктора в горизонтальном направлении.

При традиционной сборке Холбаха горизонтальная электромагнитная сила, действующая на интегральный контур индуктора составляет 849 Н.

При модифицированной сборке Холбаха (рисунок 2, 3) – 1015 Н.

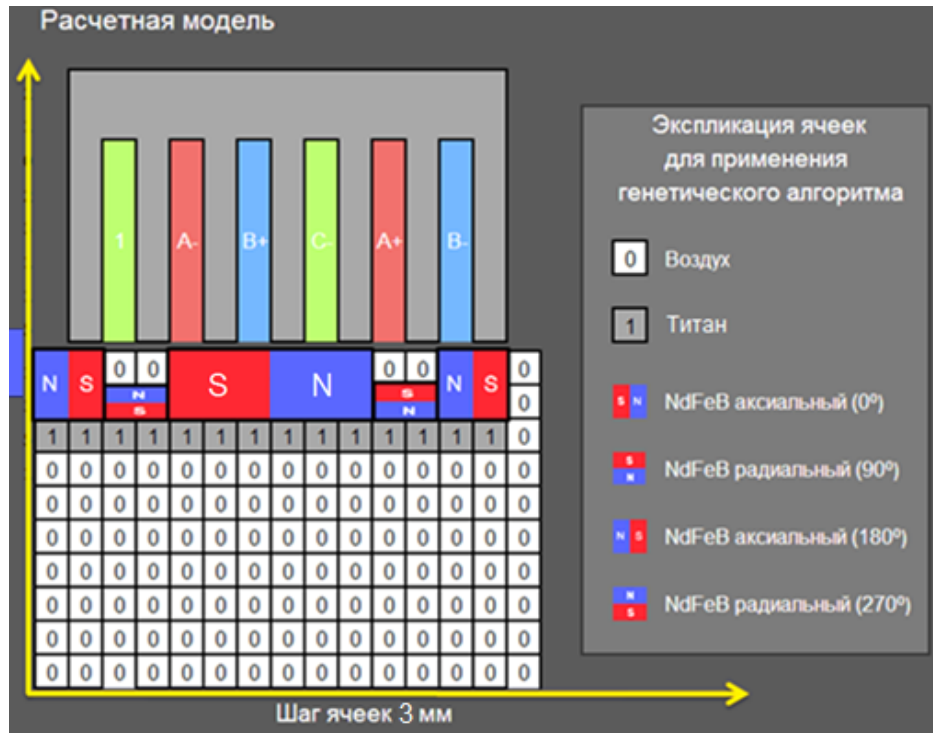


Рисунок 2 – Модифицированная магнитная сборка Холбаха

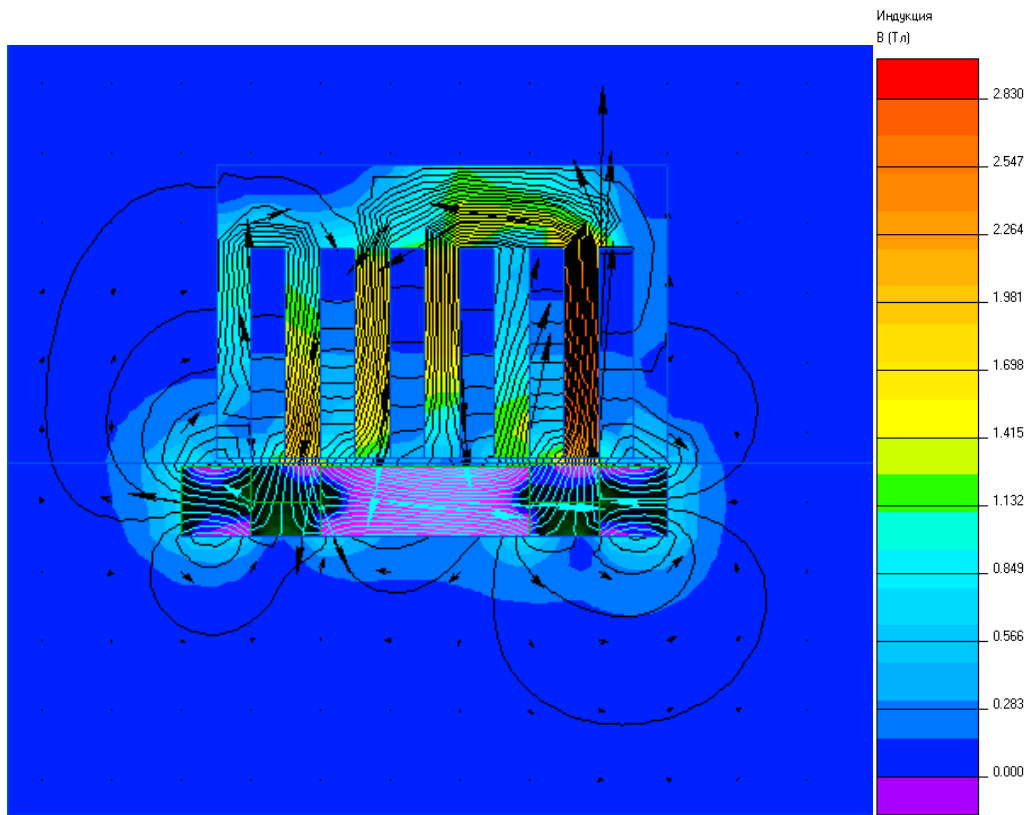


Рисунок 3 – Распределение магнитной индукции в модифицированной сборке Холбаха

Полученные результаты в ходе имитационного моделирования ЭМВПД показывают эффективность использования различных программ с целью повышения эффективности проектирования и оптимизации конструктивных параметров.

Четвертая глава посвящена физическому моделированию ЭМВПД и верификации имитационной модели.

На основе результатов, полученных в главах 2 и 3, разработана конструкторская документация на ЭМВПД с ПМ, что позволило в рамках соглашения с Минобрнауки РФ от «20» октября 2014 г. № 14.577.21.0121 создать экспериментальный образец ЭМВПД и стенд для его испытаний.

На рисунке 4 представлен КПД экспериментального образца ЭМВПД в режиме генератора при значениях хода индуктора 80 и 120 мм.

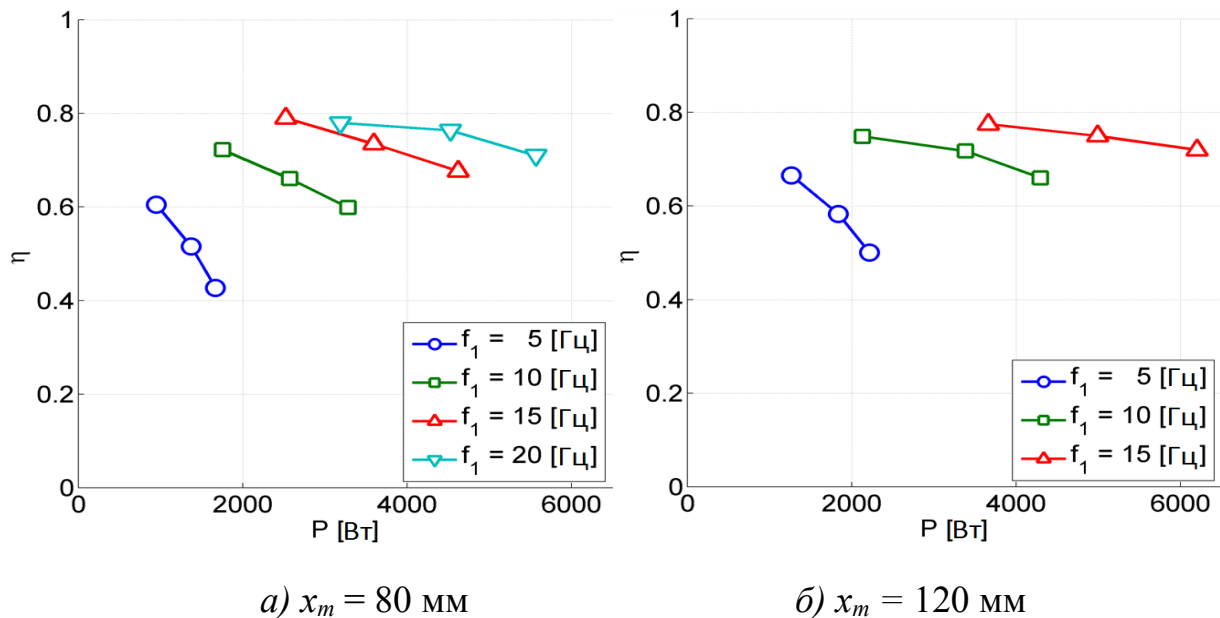


Рисунок 4 – КПД при ходе индуктора 80 мм и 120 мм

КПД ЭМВПД в режиме генератора зависит от частоты перемещения индуктора f , хода индуктора (x_m - амплитуда колебаний) и выдаваемой мощности.

На рисунке 5 представлено сравнение КПД ЭМВПД в режиме генератора, аналитически полученного на основе предложенной имитационной модели и измеренного на частотах перемещения индуктора 5 и 20 Гц.

Расхождение между расчетными и измеренными значениями составило не более 0,8 %.

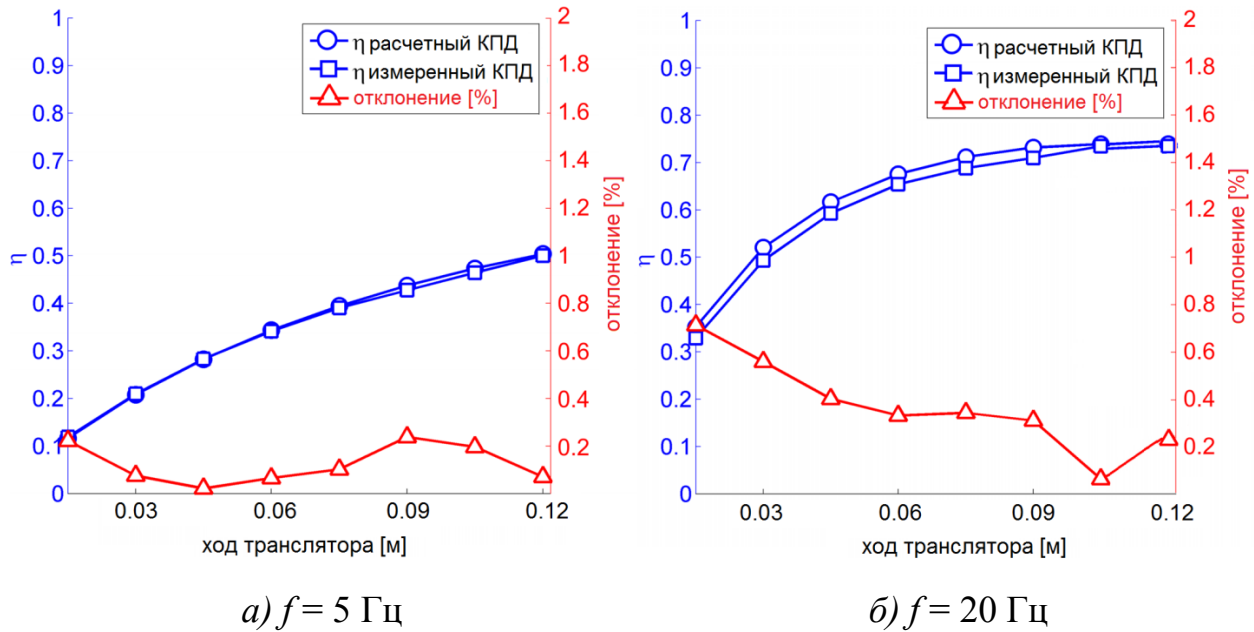


Рисунок 5 – Сравнение измеренного и рассчитанного КПД

С увеличением частоты перемещения индуктора наблюдается снижение КПД в режиме генератора, что связано с увеличением потерь в стали от частоты перемагничивания.

Разработанная синхронная ЭМВПД может найти широкое применение:

- в качестве автономного источника электроснабжения объектов малой и микро- энергетики;
- в качестве волнового генератора в морских прибрежных акваториях;
- на объектах электроснабжения нефтяных месторождений;
- в составе силовой установки гибридных транспортных средств.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Анализ основных направлений создания электромеханических линейных преобразователей на основе ЭМВПД показал, что наиболее перспективной является следующая концепция: ЭМВПД с обмоткой на статоре и постоянными магнитами на цилиндрическом полом транслятора.

2. Разработана имитационная модель синхронной ЭМВПД с ПМ, которая позволяет на этапе проектирования учитывать конструктивные параметры электрической машины, а также усилия на вал индуктора и длину его хода.

3. Создана программа для реализации параллельно-последовательных алгоритмов моделирования электрической машины возвратно-поступательного действия. Данная концепция дает возможность в процессе моделирования производить обмен данными между различными программами с целью

повышения эффективности, точности моделирования и оптимизации конструктивных размеров деталей синхронной ЭМВПД с ПМ.

4. Проведены прочностные расчеты основы индуктора и крепления магнитов на индукторе. Прочностной анализ крепления магнита на индукторе электрической машины показывает, что максимальное механическое напряжение на крепления составляет 7,72 МПа, что необходимо учитывать при выборе способа монтажа магнитов на основу индуктора. Прочностной анализ основы индуктора показывает, что максимальное механическое напряжение составило 110 МПа, что позволяет использовать титан в качестве материала основы. Таким образом, масса индуктора, вычисленного в САПР CatiaV5, составляет 5,2 кг. С целью повышения прочности и надежности крепления магнитов предложена фиксация магнитов на индукторе с помощью банджа из стекловолокна толщиной 1 мм. Изменения внесены в 3D модель индуктора для дальнейших вычислений.

5. Разработаны алгоритмы и программы для совершенствования конструкции статора, индуктора, элементов магнитной цепи синхронной ЭМВПД с ПМ, что позволяет повысить её КПД.

6. Разработан генетический алгоритм для топологической оптимизации индуктора синхронной ЭМВПД с ПМ, который позволил получить максимальную электромагнитную силу при заданных условиях. В результате топологической оптимизации индуктора сделан вывод, что максимальная электромагнитная сила при заданных условиях достигается, когда магниты представляют собой полученную в результате моделирования модифицированную сборку Холбаха. Оптимальная толщина магнитных колец в модифицированной сборке Холбаха составляет 3 – 6 мм. При такой толщине достигается максимальная электромагнитная сила, действующая на интегральный контур индуктора в горизонтальном направлении. При модифицированной сборке Холбаха горизонтальная электромагнитная сила, действующая на интегральный контур индуктора составляет 1015 Н.

7. На основе разработанных алгоритмов и программ разработана конструкторская документация на синхронную ЭМВПД с ПМ с повышенным КПД.

8. Для физического моделирования синхронной ЭМВПД с ПМ был изготовлен экспериментальный образец, а также стенд для его испытаний, что позволило верифицировать разработанную имитационную модель ЭМВПД. При этом отклонение расчетных и экспериментальных данных составило не более 0,8 %.

9. Потенциал использования разработанной синхронной ЭМВПД с ПМ лежит в диапазоне от 3 до 16 кВт, что позволяет в перспективе найти применение данной конструкции в области энергетики и гибридного транспорта.

Основные материалы диссертации опубликованы в работах:

Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международной базе данных SCOPUS / Web Of Science

1. Kopylov, A.M. Numerical Modeling of Dynamic Processes of the reciprocating reversible Electrical Machine / I.V. Ivshin, A.M. Kopylov, A.R. Safin // Applied Mechanics and Materials: Trans Tech Publications, Switzerland.. – 2015. – Vol. 792. – С. 134-142.

2. Kopylov, A.M. Selection And Justification Of Design Parameters For Reversible Reciprocating Electric Machine / I.V. Ivshin, A.R. Safin, A.N. Tsvetkov, A.M. Kopylov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – № 12. – С. 427-440.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК по специальности диссертации

3. Копылов, А.М. Определение предельных эффективных конструктивных параметров и технических характеристик обратной электрической машины возвратно-поступательного действия / А.М. Копылов, И.В. Ившин, А.Р. Сафин, Р.Р. Гибадуллин, Р.Ш. Мисбахов // Энергетика Татарстана. – 2015. – № 4(40). – С. 75–81.

4. Копылов, А.М. Разработка электрической машины возвратно-поступательного действия модульного типа / А.М. Копылов, А.Р. Сафин, Р.Р. Гибадуллин, Л.В. Долманюк, А.Н. Цветков // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2016. – №9-10. – С. 102 – 108.

5. Копылов, А.М. 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 – 17.

6. Копылов, А.М. 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 – 40.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

7. Свидетельство № 2015615063 Рос. Федерация. Программа оптимизации конструктивных размеров статора и транслятора электрической машины возвратно-поступательного действия. / А.Р. Сафин, И.В. Ившин, Н.В. Денисова, А.Н. Цветков, А.М. Копылов. – № 2015615063; заявл. 17.03.2015; опубл. 20.02.2016. – 1 с.

8. Свидетельство № 2015663605 Рос. Федерация. Программный комплекс для моделирования электрической машины возвратно-поступательного движения. / А.Р. Сафин, И.В. Ившин, Р.Ш. Мисбахов, А.Н. Цветков, А.М. Копылов, Р.Р. Гибадуллин. – № 2015619478; заявл. 07.10.2015; опубл. 20.02.2016. – 1 с.

9. Свидетельство № 2016611030 Рос. Федерация. Программа оптимизации конструктивных размеров пазов и количества витков обмоток статора электрической машины возвратно-поступательного движения. / А.М. Копылов, Р.Р. Гибадуллин, И.В. Ившин, А.Р. Сафин, Р.Ш. Мисбахов, А.Н. Цветков, А.К. Мезиков, Л.В. Долomanюк, В.В. Максимов. – № 2016611030; заявл. 08.12.2015; опубл. 25.01.2016. – 1 с.

10. Свидетельство № 2016663776 Рос. Федерация. Программа оптимизации конструктивных размеров транслятора электрической машины возвратно-поступательного движения. / А.М. Копылов, А.Р. Сафин, И.В. Ившин, Р.Р. Гибадуллин. – № 2016663776; заявл. 25.08.2016; опубл. 20.11.2016. – 1 с.

11. Свидетельство № 2018613530 Рос. Федерация. Программа топологической оптимизации электрических машин на основе генетического алгоритма. / А.М. Копылов, А.Р. Сафин, Р.Р. Хуснутдинов, В.В. Максимов, А.Н. Цветков, Р.Р. Гибадуллин. – № 2018613530; заявл. 13.11.2017; опубл. 16.03.2018. – 1 с.

и другие.

Подписано к печати
Гарнитура «Times»
Физ. печ. л. 1,16
Тираж 100 экз.

20.12.2018 г.
Вид печати РОМ
Усл. печ. л. 1,10
Заказ № 2815

Формат 60x84/16
Бумага офсетная
Уч.-изд. л. 1,00