

"УТВЕРЖДАЮ"

Проректор по научной работе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», доктор технических наук, профессор

В.К. Драгунов

« 4 » апреля 2022 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» на диссертационную работу Татевосяна Андрея Александровича «Методы проектирования и разработка тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин в составе электротехнических комплексов», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты»

На отзыв представлена диссертация «Методы проектирования и разработка тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин в составе электротехнических комплексов», которая состоит из введения, шести глав, основных результатов и выводов, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 317 страницах машинописного текста, содержит 114 рисунков, 16 таблиц, список литературы из 219 наименований.

Актуальность темы исследования

Диссертация Татевосяна Андрея Александровича посвящена развитию теории электромеханического преобразования энергии тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин на основе решения задач оптимизации их магнитных систем.

Актуальность темы определяется недостаточной изученностью вопросов разработки оптимальных конструкций тихоходных синхронных машин с постоянными магнитами (СМПМ) в составе высокотехнологичных электротехнических комплексов (ВЭТК) ветроэнергетических установок (ВЭУ) и линейного магнитоэлектрического привода (ЛМЭП) конкретного назначения.

В диссертации Татевосяна А.А. подробно проанализированы пути и решены задачи, направленные на разработку методологии проектирования тихоходных СМПМ в составе электротехнических комплексов, заключающейся в последовательном применении стадий проектирования, а именно:

- начальная стадия – выбор конструктивных схем базовых конструкций магнитных систем, учитывающих специфические особенности рабочего процесса;
- предварительная стадия – построение математической модели электрической машины, объединяющей в себе системы дифференциальных уравнений, описывающих состояние электрической и механической части, а также применение итеративного метода их решения с заданием начального приближения закона движения;
- поверочная стадия – снятие упрощающих задачу допущений по уточнению массогабаритных и энергетических показателей электрической машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами путем численного расчета магнитного поля методом конечных элементов с введением в решение задачи магнитостатики «регулярного элемента».

Предложенные методы проектирования и разработка тихоходных СМПМ в генераторном и двигательном режиме работы электротехнических комплексов рассмотрены на примерах конструктивных схем магнитных систем с высококоэрцитивными магнитами, имеющими радиальное и аксиальное намагничивание и изготовленными в форме диска, прямоугольной призмы и сегмента.

На предварительном этапе расчета конструкций тихоходных СМПМ определяются массогабаритные показатели и обмоточные данные, формулируются условия для достижения максимально возможного КПД электромеханического преобразователя, то есть минимума относительных электрических потерь. В работе получены аналитические выражения минимума относительных электрических потерь для синусоидального и несинусоидального законов движения индуктора, аппроксимируемого рядом Фурье с конечным числом слагаемых. При оптимизации магнитной системы привода дано обоснование выбора в качестве критерия оптимальности максимума удельной выходной. Определены геометрические размеры элементов магнитной системы и обмоточные данные, базирующиеся на электромагнитном и тепловом расчетах тихоходных СМПМ, удовлетворяющих исходным данным технического задания.

Получены аналитические выражения для расчета минимума относительных электрических потерь, максимума удельной выходной мощности СМПМ в генераторном режиме, зависимость коэффициента использования от коэффициента мощности нагрузки применительно к базовым конструктивным схемам тихоходных СМПМ.

Уточнение массогабаритных показателей и энергетических показателей тихоходных СМПМ производится на основе расчета магнитного поля с использованием метода конечных элементов и введения в рассмотрение «регулярного элемента» в 2D осесимметричную и 3D-модели магнитной системы СМПМ, что позволяет максимально автоматизировать процесс формирования глобальной системы линейных алгебраических уравнений расчета векторного магнитного потенциала и функции магнитного потока в узлах триангуляционной сети магнитной системы.

Предложены математические модели тихоходных СМПМ в составе ВЭТК ВЭУ и ЛМЭП, объединяющие в себе математические модели отдельных подсистем, учитывающие различную физическую природу. Произведен расчет статических и динамических характеристик тихоходных СМПМ. Верификация построенных математических моделей тихоходных СМПМ выполнена путем сопоставления расчетных и экспериментальных данных, полученных на разработанных макетных образцах.

На основе разработанных методик Татевосяном А.А. получены рекомендации по расчету и проектированию оптимальных конструкций тихоходных СМПМ, учитывающие специфику рабочего процесса электротехнических комплексов.

Отдельно рассмотрены принципы создания системы управления СМПМ модульного типа и ЛМЭП тихоходного длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора.

Учитывая возрастающую потребность к разработке и практическому использованию энергоэффективных тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин с высококоэрцитивными постоянными магнитами, работа Татевосяна А.А. является актуальной и целесообразной. Исследования, представленные в диссертации, вносят вклад в развитие теории проектирования, создания и совершенствования конструкций тихоходных СМПМ. Предложенные методики и рекомендации позволяют осуществить обоснованный выбор конструкции магнитной системы СМПМ при отсутствии передаточных и преобразовательных механизмов в соответствии с техническим заданием на разработку электротехнического комплекса.

Особый интерес данная работа представляет для организаций, разрабатывающих электротехнические комплексы ВЭУ малой мощности (до 30 кВт), а также разработчиков прецизионных ЛМЭП, к которым имеются повышенные требования к точности создаваемого усилия и позиционирования прижимного штока и силовых электромеханических преобразователей, а также ЛМЭП тихоходных одноступенчатых поршневых компрессоров, создающих усилие до 2500 Н.

Оценка структуры и содержания работы

Краткая характеристика работы. Содержание и структура диссертационной работы находятся в логическом единстве и соответствуют поставленной цели исследования. Диссертация написана ясно, использованная терминология и стиль соответствуют общепринятым нормам.

Во введении дана общая характеристика работы: актуальность, цель и основные задачи исследования, 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 первой главе рассмотрено современное состояние вопроса разработки тихоходных СМПМ в составе ЛМЭП и ВЭУ. Представлен обзор существующих электромеханических преобразователей в указанной предметной области. Дано обоснование использования СМПМ в качестве электромеханического преобразователя и на его основе построены функциональные схемы ВЭТК. Приведен анализ методов исследования физических процессов в СМПМ и показана необходимость при разработке тихоходных СМПМ использования комплексного подхода, заключающегося в поэтапном решении задачи оптимизации магнитной системы, удовлетворяющей выбранному критерию оптимальности (максимум КПД, максимум электромагнитной силы, максимум удельной выходной мощности). Предложены новые конструкции синхронных магнитоэлектрических машин, которые защищены патентами на изобретения, а также способы улучшения их выходных пусковых и эксплуатационных характеристик (уменьшение пускового момента, уменьшение реакции якоря, повышение выходного напряжения для СМПМ, работающих в генераторном режиме). Указаны особенности рабочего процесса для ЛМЭП, используемого для испытаний вязкоупругих свойств эластомеров, а также длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора с возможностью получения среднего давления 2 МПа при амплитуде хода поршня 0.2 м.

Во второй главе произведен анализ конструкций магнитных систем тихоходных СМПМ применительно к особенностям рабочего процесса ВЭУ и ЛМЭП. Рассмотрены магнитные системы, выполненные с использованием постоянных магнитов на основе сплавов из РЗМ (типа FeNdB), намагниченных в радиальном или осевом направлении. Приведены постановка и решение задачи оптимизации параметров тихоходных СМПМ в генераторном и двигательном режимах работы при удовлетворении критерию оптимальности – минимуму относительных электрических потерь, то есть максимуму КПД электромеханического преобразователя. Решение задачи оптимизации параметров тихоходных СМПМ рассмотрено на примерах разработанных конструктивных схем их магнитных систем вращательного и возвратно-поступательного движения с учетом специфических особенностей рабочего процесса в генераторном и двигательном режимах работы. Для синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) решение задачи оптимизации по достижению максимума КПД электромеханического преобразователя связано с соблюдением условия прямо пропорциональной зависимости тока в обмотке якоря от скорости движения подвижной части (индуктора).

В третьей главе рассмотрено введение «регулярного элемента» для решения задачи магнитостатики методом конечных элементов (МКЭ). Наличие в области моделирования внутренних границ раздела кусочно-однородных сред, а также зон с распределенной плотностью сторонних токов обмотки и поверхностных токов намагниченности делает предпочтительным для решения задачи магнитостатики применение метода Галеркина в сочетании с МКЭ. При осесимметричной постановке для определения функции магнитного потока и векторного магнитного потенциала в трехмерной постановке задачи магнитостатики введение «регулярного элемента» дает возможность вывести рекуррентные соотношения, позволяющие максимально автоматизировать процесс формирования глобальной системы линейных алгебраических уравнений в q узлах триангуляционной сети. Для проверки достоверности предложенного метода разработан алгоритм и программное обеспечение на языке Java по расчету магнитного поля СМПМ.

Предложен метод идентификации высококоэрцитивных постоянных магнитов по критерию одинаковой объемной намагниченности. Метод идентификации опытных образцов постоянных магнитов по критерию одинаковой объемной намагниченности основывается на определении среднеквадратичного отклонения экспериментальных зависимостей электромагнитной силы от расстояния между взаимодействующими опытными образцами постоянных магнитов (для каждого в отдельности) с магнитным отражателем, то есть отклонению их максимальной магнитной энергии, приходящейся на единицу объема. Различие параметров постоянных магнитов по этому критерию приводит к негативным последствиям работы тихоходных СДПМ, а именно: биению и вибрации вала при небольших скоростях индуктора, неравномерности наводимой ЭДС в обмотках СДПМ, повышению коэффициента трения, пускового момента.

В четвертой главе приведены расчеты оптимальных конструкций магнитных систем СДПМ в составе ВЭТК ВЭУ. Представлены картины магнитного поля с использованием программного пакета конечно-элементного анализа ANSYS Maxwell 16.0 и ELCUT 6.0, а также проведены экспериментальные исследования индукции магнитного поля в рабочем объеме макетных образцов тихоходных СДПМ. Разработаны математические модели СДПМ модульного типа и с общим цилиндрическим магнитопроводом. Выполнен расчет их пусковых и эксплуатационных характеристик. Верификация результатов исследований проведена при помощи натурных испытаний на изготовленных макетных образцах тихоходных СДПМ модульного типа и с общим цилиндрическим магнитопроводом. Конструкция СДПМ модульного типа представляет собой независимые модули (электромагниты), которые системой управления вводятся в электрическую цепь обмотки якоря с учетом скорости и силы ветра, напряжения в нагрузке (коэффициент несинусоидальности не превышает 3%), скорости вращения ветроколеса. Для магнитных систем СДПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом предложен способ, обеспечивающий минимальный пусковой момент, при котором отношение числа пазов, приходящихся на полюс и фазу, представляет собой периодическую дробь.

В пятой главе приведен расчет параметров базовых конструкций ЛМЭП для испытания вязкоупругих свойств эластомеров и тихоходного одноступенчатого поршневого компрессора на основе решения задачи оптимизации геометрии магнитной системы и обмоточных данных по критерию максимума разиваемого электромагнитного усилия. На стадии поверочных расчетов учет вязкоупругих свойств эластомеров в математической модели динамики привода представлен на основе формальной аналогии в записи уравнений процесса механической релаксации напряженно-деформированного состояния опытного образца эластомера и затухания тока в многоконтурной схеме замещения. Расчет параметров схемы замещения приведен на основе эксперимента по исследованию процесса релаксации опытных образцов эластомеров с наполнителем технического углерода марок П-550 и П-234. Базовая конструкция СДПМ выполнена на основе радиально намагниченных постоянных магнитов, имеющих форму сегмента, двух воздушных каналов для размещения катушек.

Разработана математическая модель и на ее основе выполнен расчет реологических характеристик эластомеров (динамические модули вязкоупругости и упругости, а также тангенс угла механических потерь). Сопоставление результатов расчета и экспериментального исследования на изготовленном макетном образце подтверждает корректность методики проектирования электромеханического преобразователя, а также уравнений математической модели.

Базовая конструкция тихоходного СДПМ привода тихоходного одноступенчатого поршневого компрессора представляет собой шестигранный якорь, на гранях которого размещены намагниченные в осевом направлении постоянные магниты призматической формы. Магнитная система выполнена с одним воздушным каналом. Представлены результаты расчета магнитного поля с использованием программного пакета конечно-элементного анализа ANSYS Maxwell 16.0 и ELCUT 6.0, а также проведены экспериментальные исследования индукции магнитного поля в рабочем объеме разработанного макетного образца СДПМ.

Представлена математическая модель для расчета процессов сжатия и нагнетания в тихоходной поршневой компрессорной ступени при возвратно-поступательном движении

индуктора. Получены динамические пусковые и эксплуатационные характеристики ЛМЭП и проведено их сопоставление с результатами испытаний на разработанном макетном образце.

Шестая глава посвящена вопросам оптимального управления СМППМ в составе ВЭТК ВЭУ и ЛМЭП. Для СГППМ модульного типа предложена система управления, использующая алгоритмы нечеткой логики, базирующиеся на применении нейронных сетей. Сложно прогнозируемый характер скорости и силы ветра делает целесообразным задачу подстройки параметров СГППМ по принципу «здесь и сейчас» при изменении скорости вращения вала ветроколеса. Конструкция СГППМ модульного типа позволяет разработать систему управления для переключения пар электромагнитов в зависимости от коэффициента загрузки ВЭУ, скорости вращения подвижной части и стабилизации выходного напряжения на заданном уровне. Реализация алгоритма управления выполнена в среде имитационного моделирования Simulink среды MatLab 2019 с широко применяемым расширением Neural Network Toolbox входящим в пакет Deep Learning Space. Созданный программный модуль может быть импортирован в микропроцессорную систему управления ВЭУ. Кроме этого, учитывая адаптивность нейронной сети, система управления может корректировать весовые коэффициенты алгоритма (обучение) в течение всего срока службы ВЭТК ВЭУ.

Для ЛМЭП тихоходного одноступенчатого поршневого компрессора системой управления реализован алгоритм обеспечения максимума КПД от коэффициента загрузки и получена зависимость угла сдвига фаз между силой сопротивления сжимаемого газа и током в обмотке якоря. При реализации указанного закона управления достигается условие обеспечения максимума КПД при близкой к прямо пропорциональной зависимости закона изменения тока в обмотке и скорости движения индуктора.

Рассмотрена система управления ЛМЭП на основе частотного преобразователя с открытым программным кодом, работающим на основе модели программного обеспечения MexBios. С помощью ШИМ на обмотку якоря двигателя подается напряжение, при котором формируется заданный закон тока в обмотке якоря. Указанный принцип управления двигателем является перспективным, так как позволяет реализовать необходимый с точки зрения технологического процесса закон движения индуктора. В дополнение приведены результаты расчета математической модели ЛМЭП на заданный закон движения индуктора без корректирующих действий системой управления.

Разработана блок-схема управления ЛМЭП для испытания вязкоупругих свойств эластомеров (управление электромеханическим преобразователем и термокамерой).

В заключении обобщены результаты проведенных в рамках диссертационной работы исследований.

Новизна полученных результатов

Новизна полученных диссертантом результатов заключается в том, что предложены методы проектирования и разработки тихоходных СМППМ в составе электротехнических комплексов, а именно:

– на основе решения задачи оптимизации параметров тихоходных СМППМ по критерию максимума КПД электромеханического преобразователя получены аналитические выражения взаимосвязи конструктивных параметров с энергетическими показателями работы на заданный закон движения индуктора;

– предложены аналитические уравнения взаимосвязи конструктивных параметров СМППМ с энергетическими показателями работы, полученные из решения задачи оптимизации по критерию максимума удельной выходной мощности (для тихоходных СГППМ) и развиваемого удельного электромагнитного усилия (для тихоходных СДППМ);

– предложены математические модели тихоходных СМППМ для исследования их пусковых и эксплуатационных характеристик с использованием метода конечных элементов расчета 2D- и 3D-моделей магнитного поля, составленные введением в рассмотрение «регулярного элемента»;

– предложены методики оптимального проектирования СМППМ вращательного и возвратно-поступательного движения, а также выполнена их программная реализация;

- предложен принцип формирования системой управления заданного закона движения подвижной части СДПМ, при котором достигается условие обеспечения минимума относительных электрических потерь;
- предложен принцип стабилизации выходного напряжения СГПМ модульного типа в составе ВЭУ, реализуемый системой управления на основе нейронной сети;
- предложена новая конструкция статора СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом, позволяющая уменьшить момент страгивания.

Степень достоверности результатов исследования

Достоверность полученных Татевосяном А.А. результатов базируется на методах математического и физического моделирования, обусловлена корректностью постановки задач, адекватностью используемых при исследованиях математических моделей, методов и алгоритмов, достаточной сходимостью результатов расчета и экспериментальных данных, апробацией как предварительных, так и окончательных результатов диссертационной работы.

Значимость для науки и практики результатов диссертационного исследования заключается в том, что они на стадии проектирования позволяют по заданным исходным данным корректно выбрать оптимальную конструкцию магнитной системы тихоходных СМПМ в составе ВЭУ и ЛМЭП.

Результаты работы приняты к внедрению на НТК «Криогенная техника», г. Омск; ООО «ТОР», г. Санкт-Петербург; ПАО «Россети», АО «Янтарьэнерго», г. Калининград. Результаты сравнительного исследования различных типов магнитных систем тихоходных СМПМ позволяют конструктору на этапе проектирования более обоснованно подходить к вопросу о выборе конструкции магнитной системы при разработке ВЭТК конкретного назначения.

Кроме этого, результаты исследования и разработанные макетные образцы могут быть применены в учебном процессе при изучении дисциплин по электромеханике в рамках подготовки студентов по направлению 13.03.02 и 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Общее количество публикаций по теме диссертационного исследования – 67, из которых 15 входят в перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий, утвержденных ВАК РФ для докторских диссертаций, 13 патентов на изобретения, 2 патента на полезную модель, 7 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ, 12 статей в журналах и материалах конференций, входящих в международные базы SCOPUS и Web of Science, 3 научных монографии, 15 публикаций в прочих изданиях.

Соответствие паспорту специальности

Диссертация соответствует специальности 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты», поскольку результаты представляют собой законченные научные и технические исследования и разработки в области электромеханических преобразователей энергии.

В работе присутствуют результаты, соответствующие областям исследования паспорта специальности 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты» по техническим наукам: 2 – разработка научных основ создания и совершенствования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов; 3 – разработка методов анализа и синтеза преобразователей электрической и механической энергии; 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.

В рамках работы изложены новые научно обоснованные технические положения и технологические решения по проектированию тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин:

1. Получено решение задачи оптимизации тихоходных СМПМ в генераторном и двигательном режимах по критерию оптимальности максимума КПД электромеханического преобразователя и установлена в аналитическом виде взаимосвязь конструктивных параметров с энергетическими показателями работы.

2. Предложены аналитические методы расчета максимума удельной выходной мощности тихоходной СМПМ через независимые переменные, связанные конструктивными параметрами электрической машины.

3. Разработаны методики и алгоритмы проектирования предложенных оптимальных конструкций тихоходных СМПМ в составе электротехнического комплекса на заданный закон движения подвижной части, способ стабилизации выходного напряжения тихоходных СГПМ модульного типа, основанный на применении в системе управления нейронной сети, а также способ управления СДПМ возвратно-поступательного движения при обеспечении максимума КПД электромеханического преобразователя.

Теоретическая и практическая значимость результатов, полученных автором диссертации

Практическая значимость работы подтверждается актами внедрения результатов на предприятиях и в научных организациях: НТК «Криогенная техника», г. Омск; ООО «Тор», г. Санкт-Петербург; ПАО «Россети», АО «Янтарьэнерго», г. Калининград.

Полученные в диссертационной работе результаты представляют собой новые научно обоснованные технические решения, рекомендации, методики, модели и алгоритмы расчета, внедрение которых вносит существенный вклад в область разработки тихоходных синхронных СМПМ в составе высокотехнологичных электротехнических комплексов конкретного назначения с учетом их режима работы и внешних воздействующих факторов:

- разработаны инженерные методики оптимального проектирования магнитных систем тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин по заданным выходным параметрам в соответствии с выбранным критерием оптимальности и условием обеспечения минимума массы используемых активных материалов;

- на основе единого подхода разработан комплекс математических и компьютерных моделей в пакетах программ Ansys, Elcut, Matlab/Simulink;

- предложен метод формирования численного проекционно-сеточного алгоритма для расчетов трехмерных моделей тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин, используя выведенные рекуррентные соотношения для плоского и объемного «регулярного элемента», что позволяет максимально автоматизировать процесс формирования глобальной системы линейных алгебраических уравнений в методе конечных элементов, минуя этап построения «элементных» систем уравнений;

- разработаны инженерные методики расчета выходных параметров рабочего процесса тихоходных СМПМ в составе ВЭТК конкретного назначения и режима работы, учитывающие условия допустимого нагрева и температуры проводников обмотки якоря при заданном законе движения индуктора;

- разработаны испытательные стенды для экспериментального исследования характеристик опытных образцов тихоходных СМПМ в составе ВЭТК и идентификации постоянных магнитов из сплава NdFeB в опытной партии по критерию одинаковой объемной намагниченности;

- выработаны рекомендации по проектированию тихоходных СГПМ в модельном ряду ВЭУ мощностью до 30 кВт, линейных магнитоэлектрических приводов тихоходных одноступенчатых длинноходовых поршневых компрессоров с возможностью сжатия газа до давления 2 МПа и испытательных стендов, предназначенных для исследования вязкоупругих свойств опытных образцов эластомеров.

Среди наиболее важных с практической точки зрения решений можно отметить следующие:

1. Экспериментальные образцы тихоходных СМПМ: СГПМ модульного типа и СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом мощностью 500 ВА и 1 кВА соответственно; СДПМ возвратно-поступательного движения на 100 Н и 2000 Н при амплитуде движения индуктора 0.01 м и 0.2 м соответственно;

2. Программный комплекс, реализующий методики проектирования оптимальных конструкций магнитных систем тихоходных СМПМ по критерию минимума относительных электрических потерь (максимума КПД электромеханического преобразователя); по обеспечению максимума удельной выходной мощности для СМПМ в генераторном режиме и максимума развиваемого электромагнитного усилия для СМПМ в двигательном режиме;

3. Построение методом конечных элементов 2D- и 3D-моделей магнитного поля с использованием «регулярного элемента», позволяющего максимально автоматизировать процесс формирования глобальной системы линейных алгебраических уравнений для расчета векторного магнитного потенциала и функции магнитного потока в узлах регулярной триангуляционной сети.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты исследований диссертанта могут быть использованы на предприятиях, связанных с разработкой электротехнических комплексов, в составе которых в качестве электромеханического преобразователя используются тихоходные синхронные машины с возбуждением от постоянных магнитов, а именно предложенные методы проектирования и разработки тихоходных СМПМ могут найти применение в области создания ветроэнергетических установок, а также электроприводов возвратно-поступательного движения. Материалы диссертации могут найти применение, например, в НТК «Криогенная техника» (г. Омск), ООО «ТОР» (г. Санкт-Петербург), НПФ «Мехатроника-ПРО» (г. Томск).

Использование разработанного диссертантом алгоритмического и программного обеспечения позволяет выполнить сравнительный анализ энергетических характеристик и массогабаритных показателей тихоходных СМПМ.

Результаты диссертационной работы представляют интерес для разработчиков линейных электроприводов поршневых компрессорных ступеней и прецизионных стендов для испытания эластомеров.

Результаты исследований могут быть востребованы в научной работе и образовательном процессе в профильных высших учебных заведениях.

Замечания по диссертационной работе и автореферату

1. При постановке и решении задачи оптимизации параметров СМПМ в генераторном режиме вывод о максимуме КПД электромеханического преобразователя при чисто активном характере нагрузки является частным случаем, так как зависит от характера нагрузки потребителя.

2. Автору следует пояснить, почему при выводе уравнений связи конструктивных параметров с энергетическими показателями работы СМПМ в двигательном режиме электромагнитная сила и ЭДС обмотки не зависят от перемещения индуктора, а индуктивность обмотки является постоянной величиной.

3. Почему автор уделяет в работе внимание проектированию и разработке оптимальных конструкции тихоходных СГПМ модульного типа, когда известно, что электрические машины с общим цилиндрическим магнитопроводом имеют лучшие массогабаритные показатели?

4. Разработанные автором методики расчета магнитного поля и динамических характеристик тихоходных СМПМ в генераторном и двигательном режимах не учитывают насыщение стали магнитопровода.

5. Отсутствуют оценки потерь на индуцированные токи в постоянных магнитах модульной и линейной машин, которые приводят к разогреву и размагничиванию постоянных магнитов.

6. В чем заключается признак обобщения различных конструктивных схем магнитных систем СМПМ в составе ВЭУ и ЛМЭП при поиске их оптимальной геометрии и обмоточных данных на заданные технические условия?

7. Автором не даны пояснения по разработке имитационной модели тихоходного СГПМ модульного типа с системой управления, использующей алгоритмы нечеткой логики на основе применения нейронной сети, каким уравнениям она соответствует?

8. Не приведены характеристики разработанных программных продуктов – время решения задачи, объем требуемой машинной памяти и др.

9. Методика определения параметров постоянных магнитов не соответствует рекомендованной и широко применяемой на производстве методике с использованием Катушек Гельмгольца.

10. В диссертации имеются отступления от стандартов на электротехнические термины и оформление технических текстов.

Заключение

Задачи, рассмотренные в диссертационной работе, являются актуальными. Предложены методы по развитию теории создания тихоходных синхронных машин с постоянными магнитами, основанные на решении задач оптимизации их конструктивных параметров.

Практическая реализация разработанных методик проектирования оптимальных конструкций тихоходных СМПМ возможна в следующих областях: производство высокотехнологичных приводных и генерирующих электротехнических комплексов на основе тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин. Линейные синхронные двигатели с постоянными магнитами могут найти применение в составе испытательных стендов по исследованию реологических свойств материалов, а также в составе автоматизированных приводов поршневых компрессорных ступеней. Синхронные генераторы с постоянными магнитами могут использоваться в составе ветроэнергетических установок мощностью 5–10 кВА для обеспечения нужд малой распределенной генерации.

Указанные замечания не снижают научной ценности представленной диссертации в целом. Диссертация Татевосяна Андрея Александровича на соискание ученой степени доктора технических наук является законченной научно-исследовательской работой, выполненной самостоятельно на высоком научном уровне. Совокупность разработанных в ней теоретических положений можно квалифицировать как новое достижение в развитии перспективного направления в области проектирования и разработки тихоходных СМПМ. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Работа выполнена на актуальную тему, имеет научную новизну, теоретическую и практическую значимость.

Диссертация соответствует научной специальности 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты», а также требованиям пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

Уровень и количество публикаций автора, отражающих основные полученные результаты, соответствуют пунктам 11 и 13 «Положения о присуждении ученых степеней» Постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

Работа аккуратно оформлена. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Диссертационная работа Татевосяна Андрея Александровича «Методы проектирования и разработка тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин в составе электротехнических комплексов», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты»,

является завершенной 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 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 Татевосян Андрей Александрович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты».

Отзыв составлен по результатам обсуждения диссертационной работы Татевосяна Андрея Александровича на заседании кафедры «Электромеханика и электрические и электронные аппараты» ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» 24 марта 2022 года (протокол заседания № 5/22).

Отзыв составлен:
Доктор технических наук,
профессор кафедры «Электромеханика,
электрические и электронные аппараты»

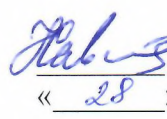

Курбатов Павел Александрович

Исполняющий обязанности
заведующего кафедрой «Электромеханика, электрические
и электронные аппараты» 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 «Электромеханика, электрические и электронные аппараты» Киселева М.Г., профессора кафедры «Электромеханика, электрические и электронные аппараты» Курбатова П.А. удостоверяю:

Начальник управления по
работе с персоналом


Савин Никита Георгиевич
« 28 » марта 2022 г.

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

Адрес организации: 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: <http://mpei.ru>

Сведения о лице, утвердившем отзыв ведущей организации на диссертацию:

Драгунов Виктор Карпович, проректор по научной работе, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», доктор технических наук профессор Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»: 111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная улица, дом 14, телефон: +7 495 362-77-22, E-mail: DragunovVK@mpei.ru, сайт: <http://mpei.ru>