

ОТЗЫВ

официального оппонента Коняева Андрея Юрьевича на диссертацию Татевосяна Андрея Александровича на тему «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»

Актуальность темы. Рассматриваемая диссертация посвящена разработке и созданию электрических машин на основе высококоэрцитивных постоянных магнитов, работающих в составе электротехнических комплексов различного назначения. Увеличение интереса к таким машинам связано с неуклонным ростом магнитной энергии постоянных магнитов, снижением их стоимости и повышением их доступности. Еще одной устойчивой тенденцией в развитии электромеханики является сращивание электрических машин и рабочих механизмов, обусловленное, в частности, стремлением к устранению механических передач. К такому классу электромеханических преобразователей относятся рассматриваемые в диссертации низкоскоростные генераторы, работающие в составе ветроэнергетических установок, и линейные электродвигатели, служащие основой для электроприводов колебательного и возвратно-поступательного движения. Создание таких электрических машин требует нетрадиционных технических решений, что обуславливает потребности в развитии их теории и методов проектирования. С учетом сказанного тема диссертационной работы является актуальной.

Соответствие паспорту научной специальности. Исследования, выполненные Татевосяном А.А., направлены на совершенствование конструкций и повышение эффективности работы электрических машин на основе постоянных магнитов, поэтому диссертация соответствует паспорту специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты». Области исследований: 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.

Структура диссертации и основные результаты разделов.

Основной текст диссертации состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы из 219 наименований, изложенных на 317 страницах. Диссертация содержит 114 рисунков и 16 таблиц, а также приложения на 48 страницах. Общий объем работы 365 страниц. Структура и оформление диссертации соответствует требованиям ГОСТ Р 7.0.11-2011 «Диссертация и автореферат диссертации».

Во введении обоснована актуальность проблемы, определены объекты и направления исследований, оценивается уровень разработанности темы. Сформулированы цель и задачи исследований, приведены основные положения, выносимые на защиту, их научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов работы.

В первой главе рассматриваются технологические задачи, решаемые с помощью разрабатываемых электрических машин, и отмечаются особенности их работы, влияющие на выбор их конструкций и режимов работы. В частности, приводятся схемы ветроэнергетических установок (ВЭУ) с различным типом синхронных генераторов с постоянными магнитами (СГПМ): классической (с общим цилиндрическим магнитопроводом якоря) и модульной конструкции. Описана работа линейных двигателей с постоянными магнитами (ЛДПМ) в составе линейного магнитоэлектрического привода для испытания вязкоупругих свойств эластомеров, заменяющего традиционные гидравлический или пневматический приводы. Представлена схема линейного колебательного привода на основе ЛДПМ для длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора. Излишне подробно обсуждаются проблемы ветроэнергетики, проблемы испытаний эластомеров и конструкции компрессоров. В то же время конструкции объектов исследования (синхронных машин с постоянными магнитами – СМПМ) и описание их работы представлены лишь схематично, что затрудняет чтение следующих разделов диссертации.

Во второй главе рассмотрены основные положения предлагаемой методики проектирования СМПМ. Предлагается поэтапное решение задачи.

На первом этапе выбираются конструктивные схемы машин и в ходе оптимизационных расчетов определяются их основные параметры. В качестве критериев оптимизации предлагаются минимум потерь в обмотке якоря (для генераторов) и максимум удельного электромагнитного усилия (для двигателей). Получены выражения, связывающие указанные показатели с параметрами машин. При этом задача оптимизации конструкций магнитных систем решена только для двух независимых переменных: отношение высоты воздушного зазора к высоте постоянного магнита и отношения массы активной части обмотки к массе постоянного магнита. Приведены примеры расчетов показателей СМПМ.

На втором этапе предполагается исследование параметров и характеристик (и их уточнение) с помощью численных методов. На третьем этапе выполняются поверочные расчеты машин по методикам, разработанным автором, с определением обмоточных данных, с уточнением размеров и технико-экономических показателей.

Основное внимание в главе 2 уделяется методике оптимизации магнитных систем рассматриваемых машин, которую правильнее назвать методикой предпроектных исследований, поскольку нет четкой постановки задач оптимизации (в явном виде не прописаны принимаемые ограничения и порядок их учета, не показан список варьируемых переменных и в расчетах учитывается только часть из них). При расчетах принимаются грубые допущения, снижающие ценность результатов (не учитывается насыщение стали, не учитывается индуктивное сопротивление рассеяния обмоток, для генератора рассматривается только режим активной нагрузки).

В третьей главе рассматривается моделирование СМПМ на основе конечно-элементного анализа. Показаны возможности решения задач расчета магнитного поля и характеристик машин в осесимметричной постановке, а также с помощью трехмерных моделей.

В двухмерной осесимметричной задаче магнитостатики предложены рекуррентные выражения для расчета значений функции магнитного потока в узлах триангуляционной сети. Введение «регулярного элемента» в расчет

магнитного поля методом конечных элементов позволяет исключить этап формирования элементных систем уравнений и записать глобальную систему линейных алгебраических уравнений в узлах триангуляционной сети для определения значений функции магнитного потока. Рассмотрено также введение трехмерного «регулярного элемента» в виде шестигранной призмы для расчета трехмерных задач магнитостатики. Получены рекуррентные выражения для расчета векторного магнитного потенциала в трехмерной области моделирования. Почему-то автор ограничивается в главе описанием математических основ метода и не приводит примеры расчета СМПМ.

Отдельное внимание в третьей главе уделено вопросу идентификации постоянных магнитов по критерию одинаковой объемной намагниченности. Различия в характеристиках постоянных магнитов могут приводить к появлению в СМПМ вибраций и биений, а также дополнительных гармоник поля и э.д.с. Автором разработан способ идентификации постоянных магнитов по силовому воздействию. Создана испытательная установка. Проведенное исследование показало, что разброс по объемной намагниченности постоянных магнитов в опытной партии может достигать 12%.

В четвертой главе представлены разработки в области тихоходных СГПМ для ветроэнергетических установок: с магнитными системами модульного типа и классической (с общим цилиндрическим магнитопроводом и явновыраженными полюсами). На основании предложенных автором методик выполнены расчеты магнитных систем генераторов, на основании которых созданы опытные образцы тихоходных СГПМ.

Показано, что достоинствами СГПМ модульного типа являются низкий коэффициент несинусоидальности э.д.с. и возможность регулирования напряжения за счет изменения числа подключенных к нагрузке независимых модулей. При исследованиях тихоходных СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом показано, что наименьший остаточный момент можно получить, если отношение пазов тихоходного генератора, приходящихся на полюс и фазу, представляет собой периодическую дробь. Предложена конструкция магнитной системы трехфазного тихоходного СГПМ на 72 паза и 11 пар полюсов.

В пятой главе рассмотрены линейные двигатели с возбуждением поля от постоянных магнитов (ЛДПМ) в составе колебательного линейного электропривода с ходом подвижной части 5мм для испытания вязкоупругих свойств эластомеров, а также длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора. Теоретические исследования двигателей дополнены опытными данными, полученными на созданных в лаборатории университета испытательных стендах.

В ходе испытаний макетных образцов двигателей подтверждена возможность достижения требуемых для промышленных установок электромагнитных усилий и параметров движения подвижных частей рассматриваемых линейных электроприводов.

Можно отметить, что глава перегружена детализацией решаемых технологических задач,

В шестой главе рассмотрены вопросы разработки систем управления тихоходными СМПМ в генераторном и двигательном режимах.

Для тихоходного СГПМ модульного типа, работающего в составе ВЭУ, предложена система управления, базирующаяся на использовании нейронной сети.

На практическом примере показан процесс создания нейронной сети в среде MATLAB.

Управление тихоходного СДПМ в составе привода одноступенчатого поршневого компрессора рассмотрено в двух вариантах, а именно: от неуправляемого выпрямителя и при помощи частотного преобразователя. Показана возможность формирования заданных законов изменения рабочих усилий и параметров движения подвижной части.

Описана система управления лабораторным стендом для испытания вязкоупругих свойств эластомеров (управление двигателем и термокамерой) с целью определения динамических параметров эластомеров (вязкости, упругости, а также тангенса угла механических потерь).

В заключении изложены основные выводы по результатам работы.

Новизна исследований и полученных научных результатов заключается в разработке новых и совершенствовании известных конструкций электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов. Новые технические решения защищены 15 патентами на изобретения и на полезные модели. Новые технические решения обусловили необходимость разработки новых математических моделей и методик расчетов СМПМ, как на стадии предпроектных исследований, так и на этапах поверочных расчетов. Новизной обладают конструкции испытательных стендов и методики экспериментальных исследований рассматриваемых СМПМ.

Ценность полученных результатов для науки и практики. Научная ценность работы состоит в разработке алгоритмов и программ расчетов новых конструкций СМПМ; в получении на основании теоретических и экспериментальных исследований рекомендаций по проектированию и эксплуатации рассматриваемых машин и электротехнических комплексов на их основе; в разработке и реализации принципов управления СМПМ, работающих в составе ВЭУ и линейных электроприводов. Практическая значимость работы определяется выполнением работы в тесном взаимодействии с заказчиками, подтвержденном актами внедрения результатов на предприятиях и в научных организациях: АО НТК «Криогенная техника» (г. Омск), ООО «Тор» (г. Санкт-Петербург), ПАО Россети «Янтарь-Энерго» (г. Калининград), кафедра «Холодильная и компрессорная техника и технологии» ОмГТУ.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций. Обоснованность и достоверность научных положений и выводов обеспечена использованием известных в электромеханике подходов к проектированию машин, применением аналитических и численных методов расчетов, результаты которых подтверждаются соответствием физическому смыслу и проверены при сопоставлении с данными экспериментальных исследований. Проведение большей части исследований в тесном сотрудничестве с заказчиками – разработчиками рассматриваемых электротехнических комплексов, которым передавались результаты, также подтверждает их достоверность.

Полнота отражения результатов диссертации в опубликованных работах. Основные результаты диссертации опубликованы в 67 печатных работах, в том числе в ведущих научных журналах, входящих в российские и международные базы данных: 12 работ в Scopus и Web-of-Science, 13 статей в журналах из списка ВАКа. Материалы, приводимые в диссертации, прошли апробацию на конференциях международного, всероссийского и регионального уровней. Можно

отметить получение 13 патентов на изобретения и 2 патентов на полезные модели и получение 7 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

Автореферат отражает содержание диссертации.

По диссертационной работе Татевосяна А.А. имеются следующие вопросы и замечания:

1. Каковы отличительные особенности именно тихоходных электрических машин (одно из ключевых слов)?

2. В работе в качестве объектов исследования рассматриваются синхронные генераторы для ВЭУ и линейные двигатели возвратно-поступательного движения. Что объединяет в диссертации столь разные электрические машины?

3. В разделе 2 при постановке задачи оптимизации варьируемые параметры четко не определены. Используемые в расчетах два частных параметра в относительных единицах не обоснованы и малоинформативны.

4. При рассмотрении электроприводов возвратно-поступательного движения не приводятся сравнения предлагаемых двигателей с альтернативными вариантами (гидро- и пневмоприводы, электромагнитные или асинхронные линейные двигатели). Варианты синхронных генераторов (классической и модульной конструкции) также не сопоставляются.

5. В разделе 2.3 при выводе выражения для удельного электромагнитного усилия используется замена реальной кривой размагничивания постоянного магнита прямой линией (рис. 2.15). Тот же подход в разделе 5.2 (рис. 5.12). Оценивалась ли вносимая такой заменой погрешность?

6. С учетом зависимости свойств постоянных магнитов от температуры для рассматриваемых машин важна оценка их теплового состояния. От электромагнитных нагрузок, определяющих тепловое состояние машин, зависят достигаемые мощности генераторов и тяговые усилия линейных двигателей. В работе не рассмотрены системы охлаждения машин, а приведенный в разделе 4.2 расчет поля температур в синхронном генераторе выполнен по упрощенной математической модели (например, допущение о циркуляции воздуха в пазах на стр. 189).

7. В разделе 4.1 приведены расчеты характеристик СГПМ модульного типа для воздушных зазоров 10, 15 и 20 мм (рис.4.10 и 4.11). Каков реальный рабочий зазор в генераторе?

8. В разделе 5.2 при оценке динамических режимов колебательного линейного электропривода установки для испытания эластомеров в уравнениях движения (5.57) и (5.62) сила тяжести вычитается из электромагнитного усилия. В то же время на схеме установки, показанной на рис. 6.15, эти усилия складываются. Что правильно?

9. Имеются замечания по оформлению диссертации:

- на рис. 2.14, где представлена схема линейного двигателя компрессора, δ обозначает высоту катушки якоря, а в формуле над рисунком δ - воздушный зазор;

- на рис. 5.11 на схемах конструкций линейных двигателей параметр d во всех случаях обозначает высоту постоянного магнита, а параметр δ в одних случаях – это зазор между постоянными магнитами и магнитопроводом, в других – толщина катушки;

- на рис. 5.16 непонятно раскрытие позиции 5 – «подвижный индуктор, образованный пятью неферромагнитными рейками»;

- на рис. 5.32 и рис. 6.8 отсутствуют шкалы на осях приводимых графиков;

- на стр. 265 во втором абзаце пропущен номер рисунка;
- имеются стилистические ошибки и неточности (например, последнее предложение первого абзаца и второй абзац на стр.9, четвертый абзац снизу на стр. 20 и др.).

Заключение

Высказанные замечания не снижают общей значимости диссертационной работы, обобщающей весьма большой объем научных исследований и практических разработок, научно-обоснованных технических и технологических решений, направленных на повышение энергетической эффективности электромеханических преобразователей на основе постоянных магнитов, на снижение временных и материальных затрат на их проектирование и разработку. Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты» и требованиям пунктов 9-11 и 13 «Положения о присуждении ученых степеней» (утв. Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842), предъявляемым к докторским диссертациям. Татевосян Андрей Александрович достоин присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты».

Официальный оппонент,
профессор кафедры «Электротехника»
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный
университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»,
доктор технических наук, профессор



Коняев Андрей Юрьевич

22.04.2022

Сведения об оппоненте и организации:

Коняев Андрей Юрьевич – профессор кафедры «Электротехника» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», доктор технических наук (05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты), профессор

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

Тел. +7 (343) 375-45-48 E-mail: a.u.konyaev@urfu.ru

Подпись Коняева А.Ю. удостоверяю :

**УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
УРФУ
МОРОЗОВА В.А.**

