

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук,
профессора Неймана Владимира Юрьевича на диссертацию
Татевосяна Андрея Александровича
«МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА ТИХОХОДНЫХ
СИНХРОННЫХ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН В СОСТАВЕ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ», представленную на соискание
учёной степени доктора технических наук
по специальности 05.09.01 – "Электромеханика и электрические аппараты"

На отзыв представлены:

- диссертация общим объёмом 317 страниц, состоящая из введения, шести глав, заключения, библиографического списка из 219 наименований и приложения;
- автореферат диссертации на 39 страницах с общей характеристикой работы, кратким изложением основного содержания результатов, полученных в диссертации, заключения и списком публикаций по теме диссертации из 67 наименований.

1. Актуальность темы диссертации

Наибольший практический интерес среди электрических машин различной мощности в настоящее время представляют синхронные магнитоэлектрические машины, используемые в составе различных электротехнических комплексов. Появление высокоэнергетических магнитов на основе сплавов редкоземельных материалов, таких как NdFeB и SmCo открыло возможности для снижения массогабаритных и повышения энергетических показателей машин. Отсутствие затрат энергии на возбуждение магнитного потока, курс на достижение максимальных удельных показателей работы при общем многообразии практических задач делают использование синхронных магнитоэлектрических машин с постоянными магнитами (СМПМ) в качестве электромеханических преобразователей энергии в составе высокотехнологичных электротехнических комплексов экономически привлекательными. Особенно экономически оправдано использование тихоходных СМПМ, исключая промежуточные механические звенья преобразования движения. Очевидно, что исключение механического звена преобразования движения в электротехническом комплексе определяет решение сложной научно-технической проблемы создания и совершенствования конструкций тихоходных СМПМ.

Следует признать, что, несмотря на достигнутые успехи в области создания и совершенствования тихоходных СМПМ, оптимизационные расчеты их конструкций требуют своего дальнейшего рассмотрения.

В этой связи создание и совершенствование тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин вращательного и возвратно-поступательного движения в составе электротехнических комплексов на основе разработки и реализации методов их проектирования является решением актуальной научно-технической проблемы. Развитию этого актуального научного направления посвящена диссертационная работа Татевосяна А.А.

2. Анализ содержания диссертации по разделам и её завершённости в целом

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и основные задачи исследований. Определена область, объект и предмет исследований. Отражена научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов, научные положения, выносимые на защиту. Отмечен личный вклад соискателя. Приводятся данные о реализации и апробации результатов.

В первой главе рассмотрена область применения и особенности рабочих режима тихоходных СМПМ в составе высокотехнологичных электротехнических комплексов (ВЭТК). Показано, что при отсутствии передаточных и преобразовательных механизмов энергоэффективность электротехнического комплекса определяется процессами энергопреобразования в магнитной системе синхронной магнитоэлектрической машины. Приведена классификация пусковых и эксплуатационных характеристик тихоходных СМПМ в составе ВЭТК, работающих в двигательном и генераторном режиме вращательного и возвратно-поступательного движения, подлежащих улучшению в процессе проектирования и разработки.

На основании исследований, проведенных в первой главе, раскрыто понятие объекта исследования тихоходной СМПМ в составе ВЭТК. Указаны направления улучшения выходных показателей СМПМ, а также определены особенности рабочего процесса и методы исследования ВЭТК ВЭУ и ЛМЭП тихоходного одноступенчатого поршневого компрессора и электропривода по испытанию вязкоупругих свойств эластомеров. Основные выводы данной главы позволили обоснованно сформулировать цель данной работы и поставить задачи ее реализации.

Во второй главе проведен анализ магнитных систем тихоходных СМПМ вращательного и возвратно-поступательного движения в составе ВЭУ и ЛМЭП с учетом особенностей рабочего процесса. Дан всесторонний анализ существующих критериев оптимальности и методов оптимизации применительно к работе тихоходных СМПМ в режимах генератора и двигателя. Выполнена формулировка задачи оптимизации параметров СМПМ путем построения ее математической модели в составе ВЭТК. Представлено решение задачи оптимизации для тихоходных СМПМ модульного типа и с общим цилиндрическим магнитопроводом. Определены соотношения между электро-

магнитными параметрами и выходными характеристиками СМПМ. На основе выбранного критерия оптимальности минимума удельных потерь дано обоснование базовым конструкциям СГПМ модульного типа и с общим цилиндрическим магнитопроводом в составе ВЭУ. На основе выбранных критериев оптимальности минимума удельных потерь и максимума тягового электромагнитного усилия дано обоснование базовым конструкциям тихоходных СМПМ в составе ЛМЭП. Представлено решение задачи оптимизации конструкции тихоходной СМПМ. Показана актуальность решения задачи уточнения конструктивных и электромагнитных параметров тихоходных СМПМ, полученных на основе численного расчета магнитного поля.

Третья глава посвящена исследованию магнитного поля СМПМ на основе конечно-элементного анализа. Основное место в уточнении решения задачи оптимизации базовой конструкции СМПМ в составе ВЭТК занимает расчет магнитного поля. Представлено решение для осесимметричного и трехмерного распределения магнитного поля. Получены рекуррентные соотношения для формирования численного проекционно-сеточного алгоритма осесимметричной и трехмерной модели магнитного поля. Разработана математическая модель трехмерного магнитного поля, которая позволяет выполнить программную реализацию на ПК для уточнения расчета параметров СМПМ в составе ВЭУ и ЛМЭП. Предложена методика идентификации ПМ по критерию одинаковой объемной намагниченности, обеспечивающая качественный отбор опытных образцов постоянных магнитов на основе РЗМ для создания тихоходных СМПМ.

В четвертой главе рассмотрены примеры практической реализации СГПМ модульного типа и с общим цилиндрическим магнитопроводом в составе ВЭТК ВЭУ. Приведено решение задачи оптимизации массогабаритных параметров СГПМ с учетом особенностей рабочего режима ВЭУ и обоснование их базовых конструкций. На основе решения задачи оптимизации конструкций тихоходных СГПМ модульного типа и с общим цилиндрическим магнитопроводом в составе ВЭУ разработана методика их оптимального проектирования с достижением максимума удельной мощности на выходе генератора. На основе предложенной методики разработано программное обеспечение, которое позволяет выполнить оптимизационные расчеты конструкций тихоходных СГПМ модульного типа и общим цилиндрическим магнитопроводом. Следует отметить, что методика оптимального проектирования технически реализована в макетных образцах тихоходных СГПМ, созданием лабораторных стендов для испытания синхронных генераторов в различных режимах работы. Разработаны имитационные модели оптимальных конструкций СГПМ и проведена их верификация путем исследования макетных образцов СГПМ на испытательном стенде с подтверждением результатов расчета.

В пятой главе рассмотрены подходы к проектированию и разработке СДПМ для ВЭТК ЛМЭП: прецизионного ЛМЭП для испытания вязкоупругих

свойств эластомеров и ЛМЭП тихоходного одноступенчатого поршневого компрессора. На основе решения задачи оптимизации разработана методика оптимального проектирования тихоходных СДПМ в составе ЛМЭП, предназначенных для испытания реологических свойств эластомеров, и одноступенчатого длинноходового поршневого компрессора, удовлетворяющих выбранным критериям оптимальности. Получены оптимальные соотношения для рассматриваемых вариантов исполнения тихоходных СМПМ. Выполнена техническая реализация макетного образца тихоходных СМПМ в составе ЛМЭП для испытания вязкоупругих свойств эластомеров и одноступенчатого поршневого компрессора. Разработаны имитационные модели оптимальных конструкций СДПМ и проведена их верификация в составе ЛМЭП. На основе имитационного моделирования и экспериментального исследования получены пусковые и эксплуатационные характеристики ЛМЭП.

В шестой главе рассмотрены принципы управления, позволяющие реализовать условия, используемые при проектировании оптимальных конструкций магнитных систем тихоходных СМПМ в составе ВЭТК. Подтверждена эффективность применения системы управления на базе нечеткой логики для работы тихоходного СГПМ модульного типа в составе ВЭТК ВЭУ. Разработана система управления тихоходного СДПМ в составе ЛМЭП одноступенчатого тихоходного длинноходового поршневого компрессора, обеспечивающая максимум КПД электромеханического преобразователя на заданный закон движения индуктора. Разработан макетный образец электротехнического комплекса одноступенчатого поршневого компрессора, включающий в свой состав систему управления, в котором в качестве электромеханического преобразователя используется тихоходный СДПМ возвратно-поступательного движения. Разработана система управления термокамерой и СДПМ в составе ЛМЭП для испытания вязкоупругих свойств эластомеров.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты работы, подведены итоги проведенных исследований.

В приложениях приведены акты внедрения результатов диссертационного исследования, патенты на изобретения, методика и пример расчета синхронного генератора модульного типа с постоянными магнитами для безредукторной ВЭУ с вертикальной осью вращения, методика и пример расчета синхронного генератора с постоянными магнитами на основе сплава NdFeB мощностью 10 кВА для безредукторной ВЭУ.

Исходя из анализа содержания диссертационной работы Татевосяна А.А., можно заключить, что диссертация обладает внутренним единством, написана доступным для понимания языком, а по своему объёму, структуре и направленности полученных результатов является законченным исследованием.

В основном выводы и результаты диссертационной работы соответствуют поставленным задачам исследований. Указанная цель работы в полной мере реализована в рамках представленной диссертационной работы.

Диссертация соответствует критериям п. 10 положения ВАК "О порядке присуждения учёных степеней" (*Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 г., № 842*): диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку, содержатся сведения о практическом использовании автором диссертации научных результатов.

В диссертации сделаны необходимые ссылки на источники заимствования материалов и авторов.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации и отражает её основные результаты.

3. Соответствие работы паспорта научной специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты»

Тема и содержание диссертации Татевосяна А.А. соответствуют паспорту научной специальности 05.09.01 – "Электромеханика и электрические аппараты".

По пунктам специальности: п. 2. Разработка научных основ создания и совершенствования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов; п. 3. Разработка методов анализа и синтеза преобразователей электрической и механической энергии; п. 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.

По отрасли наук: технические науки.

4. Достоверность, новизна и обоснованность полученных автором научных результатов

Достоверность результатов определяется корректностью постановок задач, обоснованностью принятых допущений и адекватностью используемых при исследованиях математических моделей и методов, а также сопоставлением с данными исследований других авторов, качественным совпадением и согласованностью результатов расчета и экспериментальных данных, апробацией предварительных и окончательных результатов диссертационной работы.

Новизна полученных автором научных результатов состоит:

1. В предложенном методе создания энергоэффективных тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин с постоянными магнитами в составе высокотехнологичных электротехнических комплексов генерирования электроэнергии и электропривода используется итеративный процесс анализа, основанный на совместном решении уравнений, описывающих состояние электромагнитной и механической частей СМПМ.

2. В предложенном методе оптимального проектирования тихоходных СМПМ, отличающемся от известных тем, что решением задачи оптимизации параметров СМПМ по максимуму КПД электромеханического преобразователя установлена взаимосвязь конструктивных параметров с энергетическими показателями работы электрической машины в зависимости от закона движения подвижной части, уточнения пусковых и эксплуатационных характеристик, сокращения временных и материальных затрат на проектирование.

3. В предложенном методе оптимизации конструкций магнитных систем тихоходных СМПМ в составе ВЭУ и ЛМЭП по максимуму удельной полезной мощности, исходя из заданных технических условий на проектирование.

4. В предложенном методе формирования численных проекционно-сеточных трехмерных моделей магнитного поля тихоходных СМПМ путем введения в рассмотрение «регулярного элемента» и получении рекуррентных соотношений, позволяющих максимально автоматизировать процесс формирования глобальной системы линейных алгебраических уравнений в методе конечных элементов, сократив тем самым временные и материальные затраты.

5. В разработке методик и алгоритмов оптимального проектирования конструктивных схем тихоходных СМПМ в составе электротехнического комплекса на заданный закон движения подвижной части с учетом тепловых потерь в элементах конструкции и особенностей рабочего процесса.

6. В предложенной методике идентификации опытных образцов постоянных магнитов для конструирования тихоходных СМПМ в составе электротехнического комплекса по критерию одинаковой объемной намагниченности.

7. В определении нового принципа формирования системой управления закона движения подвижной части линейной тихоходной СМПМ в двигательном режиме в составе электротехнического комплекса длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора на основе максимума КПД электромеханического преобразователя.

8. В предложенном способе стабилизации выходного напряжения ВЭУ на основе тихоходных СМПМ модульного типа, позволяющем обеспечить системой управления на базе нейронной сети стабилизацию напряжения в зависимости от скорости ветра и коэффициента загрузки.

9. В Предложенном новом способе повышения выходного напряжения СМПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом в составе ВЭУ, отличаю-

щимся от известных тем, что повышение выходного напряжения достигается применением новой конструктивной схемы магнитной системы индуктора и магнитопровода якоря, позволяющей реализовать последовательное соединение выпрямительных блоков к каждой фазе СГПМ с уменьшением переменной составляющей выходного напряжения.

Все полученные в диссертации результаты являются новыми и на основании выполненных автором исследований могут быть квалифицированы как *изложение новых научно обоснованных технических решений, внедрение которых вносит значительный вклад* в область разработки тихоходных СМПМ в составе электротехнических комплексов.

Все научные положения, выносимые на защиту, выводы и рекомендации принадлежат лично соискателю.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций является достаточной.

5. Теоретическая и практическая значимость и реализация результатов

Теоретическая и практическая значимость работы заключается:

- на основе единого подхода разработан комплекс математических моделей реализованных в пакетах программ ANSYS, ELCUT, Matlab вариантов конструктивных схем тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин с постоянными магнитами в составе электротехнических комплексов, обеспечивающих широкие возможности для решения задач анализа и синтеза, внедрение которых в практику проектирования позволит сократить сроки выполнения проектных работ и повысить их качество;

- предложен метод формирования численного проекционно-сеточного алгоритма на регулярной триангуляционной сети для расчетов осесимметричных и трехмерных полевых моделей тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин в цилиндрической (2D) и прямоугольной (3D) системах координат, используя выведенные рекуррентные соотношения плоского и объемного «регулярного элемента» численного конечно-элементного анализа, что позволяет максимально автоматизировать процесс формирования глобальной системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) метода конечных элементов, минуя построения элементных систем уравнений;

- разработаны инженерные методики оптимального проектирования магнитных систем тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин по заданным выходным параметрам в соответствии с выбранным критерием оптимальности;

- разработаны инженерные методики расчета выходных параметров рабочего процесса тихоходных СМПМ в составе электротехнических комплексов

конкретного назначения и режима работы при заданном законе движения индуктора, учитывающем процессы теплопередачи между элементами магнитной системы;

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

- предложены принципы технической реализации систем управления электротехнических комплексов ВЭУ и ЛМЭП, позволяющие повысить энергоэффективность тихоходных СМППМ;

- выработаны рекомендации по проектированию тихоходных СГППМ в модельном ряду мощностью до 30 кВт, линейных магнитоэлектрических приводов тихоходных длинноходовых одноступенчатых поршневых компрессоров.

Полученные в работе научные результаты проверялись, корректировались и внедрялись в АО НТК «Криогенная техника», г. Омск, ООО «Тор», г. Санкт-Петербург; ПАО «Россети» АО «Янтарьэнерго» г. Калининград.

6. Апробация работы и подтверждение опубликованных основных положений работы

Основные теоретические положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научно-технических конференциях различного уровня.

По теме диссертационного исследования опубликовано 67 печатных работ, из которых 12 научные статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 12 статей в журналах и материалах конференций, входящих в международные базы SCOPUS/Web of Science, 13 патентов на изобретения и 2 патента на полезные модели, 7 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ, 3 монографии.

7. Общие замечания и вопросы по диссертационной работе

1. В работе недостаточно освещен вопрос об использовании общего методологического подхода к проектированию СМППМ различного назначения, поскольку речь идет не об одной разработанной конструктивной схеме СМППМ, применимой для генераторного и двигательного режимов работы, а нескольких конструктивных схем отдельно для режима генератора и отдельно для режима двигателя.

2. В работе не указаны причины, ограничивающие предложенные рекомендации по оптимальному проектированию СГППМ модельным рядом мощности до 30 кВт.

3. Не рассмотрен вопрос об экономическом эффекте от внедрения разработанных методов расчета оптимальных конструкций тихоходных СМПМ в составе электротехнических комплексов.

4. На стр. 110 диссертации в формуле 2.64 оптимальное относительное напряжение $u_{\text{опт}}^*$ при активной нагрузке зависит от соотношения индуктивных сопротивлений фазы обмотки статора по продольной и поперечной осям, однако, с учетом равенства индуктивных сопротивлений по продольной и поперечной осям для тихоходного синхронного генератора с общим цилиндрическим магнитопроводом не понятен зачем при расчете $u_{\text{опт}}^*$ это отношение используется.

5. В диссертации рассмотрены четыре электротехнических комплекса разного назначения с тихоходными СМПМ, работающие в генераторном и двигательном режимах. При решении задачи оптимизации параметров тихоходных СМПМ используются различные критерии оптимальности. Тогда возникает вопрос, в чем заключается общий подход к оптимальному проектированию тихоходных СМПМ различного назначения?

6. В тексте диссертации и автореферате имеют место отступления от общепринятых электротехнических терминов, например понятие об одинаковой объемной намагниченности опытных образцов постоянных магнитов?

7. Во второй главе при решении задачи оптимизации в выражении (2.116) используется относительное значение намагничивающей силы обмотки якоря, приходящейся на одну пару полюсов. Учитывая высокую магнитную энергию высококоэрцитивных постоянных магнитов (более 800 кДж/м^3), размагничивающий эффект реакции якоря будет незначителен и его учет на предварительной стадии расчета нецелесообразен.

8. В диссертации представлен метод расчета магнитного поля методом конечных элементов с введением в рассмотрение «регулярного элемента» и показано его применение к решению задачи магнитостатики для тихоходного синхронного двигателя возвратно-поступательного движения. В полной мере, возможности разработанного подхода можно было продемонстрировать применительно к расчету магнитного поля тихоходного СМПМ.

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки результатов работы.

8. Заключение

Оценивая работу в целом, считаю, что указанные замечания не снижают общей положительной оценки результатов исследования. Диссертация Татевосяна А.А. «Методы проектирования и разработка тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин в составе электротехнических комплексов» яв-

ляется завершённой научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены новые научно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в область разработки тихоходных СМППМ в составе электротехнических комплексов.

Диссертация соответствует научной специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты», обладает внутренним единством и является законченным научным исследованием, выполненным на актуальную тему. Считаю, что работа соответствует критериям п. 9, 10, 11, 13, 14, которым должны отвечать диссертации на соискание учёных степеней в соответствии с положением "О порядке присуждения учёных степеней", утверждённом Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г., №842, а ее автор Татевосян Андрей Александрович заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты».

Официальный оппонент, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретических основ электротехники Новосибирского государственного технического университета

Нейман Владимир Юрьевич

«30» апреля 2022 г.

Сведения об оппоненте:

Диссертация защищена по специальности: 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты.

Адрес организации: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет».

Телефон рабочий: +7(383) 346-04-42; e-mail: nv.nstu@ngs.ru.

Подпись Неймана В.Ю., д.т.н., профессора, заведующего кафедрой теоретических основ электротехники Новосибирского государственного технического университета заверяю:

 *наг. отдела кадров ФГБОУ ВО НГТУ*
Товалова

