

## **Отзыв**

официального оппонента 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»

### **Актуальность темы диссертации**

В рамках принятой в стране Энергетической стратегии на период до 2035 года особый интерес представляет развитие распределённой генерации на основе возобновляемых источников, в частности, ветроэнергетических установок (ВЭУ). Повышение энергоэффективности ВЭУ возможно путем повышения энергетических характеристик синхронных генераторов при оптимизации их конструктивных параметров. Перспективным типом электрических синхронных генераторов являются тихоходные генераторы, применение которых позволяет исключить использование механических редукторов и преобразователей движения в ВЭУ, что повышает их надежность и снижает капитальные и эксплуатационные затраты.

С другой стороны, для приводных электротехнических комплексов находят широкое применение синхронные двигатели с высокоэнергетическими постоянными магнитами. В частности, тихоходные синхронные двигатели используются в линейном магнитоэлектрическом приводе (ЛМЭП) поршневых компрессоров и насосов. В этих комплексах также наметилась устойчивая тенденция к необходимости повышению мощности и увеличению развиваемого усилия. Повышение надежности и технологичности электротехнического комплекса, снижение его себестоимости, здесь также, в целом достигается за счет исключения механизмов передачи и преобразования движения, а это в свою очередь делает задачу проектирования электромеханического преобразователя жестко подчиненной требованиям нагрузки. Учет свойств сжимаемого газа в компрессорных агрегатах, закона движения поршня компрессора обуславливает необходимость разработки новых методов проектирования конструкций синхронных машин с возбуждением магнитного потока от постоянных магнитов.

На основании вышеизложенного, считаю, что тема диссертационная работа Татевосяна А.А., посвященная разработке, оптимизационным методам расчета и проектирования синхронных машин с постоянными магнитами в составе электротехнических комплексов является актуальной и представляет научный и практический интерес.

## Краткая характеристика работы

**Во введении** дана краткая характеристика диссертационной работы: представлены актуальность, цели и задачи исследования, объект и предмет исследования, методология и методы исследования; определены научная новизна работы и выносимые на защиту научные положения; приведены сведения о реализации и внедрении полученных результатов, апробации работы и публикациях; приведена структура и краткое содержание диссертации.

**В первой главе** диссертации представлены сведения о современном состоянии исследований синхронных машин с постоянными магнитами, их проектировании и разработки. Для тихоходных магнитоэлектрических машин предложена классификация пусковых и эксплуатационных энергетических характеристик, представляющих интерес при решении задач оптимизации электрических машин с постоянными магнитами для генераторного и двигательного режимов работы. На основе составленных функциональных схем ВЭУ и ЛМЭП описан объект исследования в составе электротехнического комплекса. Показано, что одним из перспективных направлений является использование тихоходных магнитоэлектрических двигателей возвратно-поступательного движения в составе привода длинноходового поршневого компрессора для обеспечения средних и высоких давлений одной ступенью. Традиционно применяемые гидравлические приводы обладают рядом ограничений, связанных с повышенными требованиями к температуре окружающей среды и герметичности системы. В связи с этим, разработка мощных магнитоэлектрических двигателей, с относительно легко реализуемым управлением существенно расширяют области применения компрессорных агрегатов. Внедрение ЛМЭП одноступенчатых поршневых компрессоров является перспективным для автономных подвижных объектов.

В этой главе выполнена постановка задачи исследования в рамках создания новых научно-обоснованных технических решений по разработке методов проектирования тихоходных магнитоэлектрических машин вращательного и возвратно-поступательного движения, работающих в составе установок генерации электрической энергии и электропривода. Цель работы заключается в создании и совершенствовании тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин: повышении их энергетических показателей, снижении массогабаритных показателей, минимизации временных затрат на оптимизацию конструкций тихоходных машин.

**Во второй главе** представлена методологическая схема проектирования тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин с выделением предварительного и поверочного этапов расчетов. Рассмотрена математическая формулировка задачи оптимизации тихоходных синхронных машин с постоянными магнитами (СМПМ), работающих в двигательном и генераторном режимах. Получены аналитические

выражения для расчета минимума относительных электрических потерь тихоходного синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ) для синусоидального и несинусоидального законов движения индуктора, аппроксимируемого конечным числом членов ряда Фурье.

Получено решение задачи оптимизации конструктивных параметров тихоходных СМПМ, удовлетворяющее критерию максимальной удельной выходной мощности в режиме генератора и максимального развиваемого удельного электромагнитного усилия в режиме двигателя, с выводом критериальных соотношений по двум независимым переменным: отношению высоты постоянного магнита к высоте воздушного зазора и отношению массы активной части витков обмотки к массе постоянных магнитов.

**В третьей главе** представлены подходы к расчету магнитного поля для осесимметричной и трехмерной задачи магнитостатики методом конечных элементов (МКЭ). В этом направлении актуальностью и практической значимостью являются алгоритмы, позволяющие сократить временные затраты, а также снизить требования к аппаратной части персональных компьютеров (требования к центральному процессору, объему памяти на жестком диске и ОЗУ). Автором предложен «регулярный элемент», представляющий собой шестиугольник (плоская задача для конструкций магнитных систем с осевой симметрией) или шестигранную призму (трехмерная задача) позволяющий исключить этап составления матриц элементов. Для рассматриваемых случаев записаны уравнения через объемные  $L$ -координаты (функция магнитного потока и векторного магнитного потенциала). Предложенные автором алгоритмы используются производителями универсальных программам расчета электромагнитного поля.

Нестабильность и неоднородность свойств постоянных магнитов приводит к нарушению симметрии электрических машин. Для уменьшения биения и вибрации вала при окружных скоростях вращения индуктора, радиальных усилий, действующих на опорные подшипники, создающие дополнительные потери на трение в тихоходных СМПМ предложен способ и устройство для испытания образцов высококоэрцитивных постоянных магнитов в опытной партии по критерию одинаковой объемной намагниченности.

**В четвертой главе** на основе решения задачи оптимизации представлено обоснование базовых конструкций тихоходных синхронных магнитоэлектрических генераторов с постоянными магнитами (СГПМ) модульного типа и общим цилиндрическим магнитопроводом. На основе разработанных макетных образцов тихоходных СГПМ произведена проверка предложенных методик и математических моделей расчета их параметров. Проверка проводилась по расчетным массогабаритным конструктивным параметрам магнитных систем, а также энергетических показателям и характеристикам (удельная выходная мощность, внешняя

характеристика генератора, остаточный момент). Для СГПМ модульного типа выполнена оценка влияния величины воздушного зазора и высоты постоянных магнитов на его энергетические показатели. Для СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом показано, что наименьший момент страгивания можно получить в том случае, если отношение количества пазов, приходящихся на полюс и фазу, представляет собой периодическую дробь.

**В пятой главе** представлены расчетные параметры магнитных систем тихоходных СДПМ в составе аппаратно-измерительного комплекса по испытанию вязкоупругих свойств эластомеров и линейного магнитоэлектрического привода одноступенчатого поршневого компрессора. Представлены математические модели СДПМ для исследования статических и динамических характеристик и проведена их верификация на разработанных их макетных образцах.

**В шестой главе** представлены принципы организации систем управления электротехническими комплексами с тихоходными СМПМ, реализующие заданные техническим заданием режимы работы. Для тихоходных СГПМ модульного типа представлена адаптивная нейросетевая модель системы управления, учитывающая скорость вращения ротора и коэффициент загрузки при обеспечении заданного уровня выходного напряжения. Разработана имитационная модель и определены динамические характеристики СГПМ модульного типа. Проведена верификация результатов математического моделирования путем сопоставления с результатами экспериментального исследования макетного образца СДПМ для привода тихоходной поршневой компрессорной ступени. Установлено, что степень расхождения результатов математического моделирования СМПМ и исследовательских испытаний не превышает 5%. Выявлено, что адекватность математического моделирования динамических характеристик позволяет воспроизводить заданные техническим заданием параметры, состояние и поведение тихоходных СМПМ с достаточной для поставленных целей точностью.

Предложена структурная схема системы управления СДПМ для испытания реологических свойств эластомеров, реализующая заданный закон движения прижимного штока, действующего на опытный образец эластомера и контролирующая температуру в термокамере.

**В заключении** представлены основные результаты и выводы по диссертационной работе.

**В приложениях** представлены полученные патенты на изобретения, свидетельства на регистрацию программ, акты об использовании и внедрении результатов работы, а также методики расчета, протоколы испытаний исследуемых электрических машин.

## Научная новизна

В диссертационной работе Татевосяна А.А. получены новые научно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие теории электромеханического преобразования энергии в тихоходных СМППМ, а также в совершенствовании электротехнических комплексов и систем на основе тихоходных СМППМ. Научная новизна основных положений и выводов диссертационной работы заключается в следующем.

1. Разработан общий подход к созданию тихоходных СМППМ, в котором совместное решение уравнений, описывающих состояние электромагнитной и механической частей основывается на использовании итеративного процесса, уточняющего заданный в качестве начального приближения закон движения индуктора.

2. Разработан метод расчета конструктивных параметров магнитных систем тихоходных СГППМ, который основывается на решении задачи оптимального управления, при котором обеспечивается минимум относительных потерь (максимум КПД электромеханического преобразования) для заданного закона движения индуктора.

3. Разработан метод оптимизации конструкций магнитных систем тихоходных СМППМ, который основывается на выводе уравнений для двух независимых переменных, а именно отношении величины воздушного зазора к высоте постоянного магнита и отношении массы активной части витков обмотки к массе постоянных магнитов, при которых обеспечивается максимум критерия оптимальности удельной выходной мощности (удельного электромагнитного усилия).

4. Предложен подход к расчету магнитного поля для конструкций магнитных систем тихоходных СМППМ методом конечных элементов с введением трехмерного «регулярного элемента», позволяющим вывести рекуррентные соотношения и автоматизировать процесс составления глобальной СЛАУ для расчета векторного магнитного потенциала в узлах триангуляционной сети.

5. Предложен способ идентификации образцов высококоэрцитивных постоянных магнитов в опытной партии по критерию одинаковой объемной намагниченности, осуществлять их выборку для создания тихоходных СМППМ.

6. Предложены принцип управления тихоходным СДППМ в составе привода одноступенчатого поршневого компрессора, сформулированный на основе решения задачи оптимизации, позволяющий обеспечить наибольший КПД электромеханического преобразования энергии.

7. Предложен способ управления СГППМ модульного типа в составе ветроэнергетической установки, реализованный на основе

нейронной сети, позволяющий стабилизировать выходное напряжение в зависимости от скорости ветра и коэффициента загрузки.

### **Степень обоснованности и достоверности научных положений и выводов**

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов, представленных в диссертации, подтверждается:

- корректным применением для теоретических выводов соответствующего математического аппарата;
- корректной постановкой экспериментов и применением поверенных измерительных приборов;
- совпадением и достаточной сходимостью результатов расчета и экспериментальных данных;
- апробацией промежуточных и окончательных результатов диссертационной работы.

### **Практическая значимость работы**

Результаты работы внедрены и используются на практике.

1. Разработанный программный комплекс, реализующий методики проектирования и разработки оптимальных конструкций магнитных систем электромеханических преобразователей с постоянными магнитами, работающих в двигательном и генераторном режимах, на основе установленных аналитических выражений взаимосвязи конструктивных параметров СМПМ с энергетическими показателями работы может использоваться для задач оптимизации тихоходных СМПМ в составе ветроэнергетических установок малой энергетики и приводных комплексов, для которых важным является обеспечение заданного техническим заданием закона движения.

2. Изготовленные макетные образцы тихоходных СМПМ различного конструктивного исполнения могут использоваться для отладки алгоритмов управления, в том числе с применением интеллектуальных систем.

3. Разработанное программное обеспечение для проектирования тихоходных СМПМ может быть использовано для производства энергоэффективных ВЭУ малой мощности (до 30 кВт), а также для привода длинноходовых поршневых компрессоров и насосов с улучшенными массогабаритными показателями и характеристиками.

## **Личный вклад соискателя в разработку научной проблемы, апробация работы и подтверждение опубликования основных положений работы**

Полученные в работе результаты являются основной частью научных и исследовательских работ по разработке методов проектирования и синтеза оптимальных конструкций тихоходных синхронных машин в составе электротехнических комплексов конкретного назначения, создания макетных образцов электрических машин и исследование их пусковых и эксплуатационных характеристик на разработанных испытательных стендах.

Автору принадлежит постановка и решение задач оптимизации параметров тихоходных СМППМ, обоснование и разработка методологии их проектирования, удовлетворяющих требованиям технического задания.

По теме представленной диссертации автором опубликовано 67 работ, в том числе, 3 монографии, 17 статей в российских рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 12 статей в зарубежных изданиях, индексируемых международными базами WoS и Scopus, а также 15 патентов РФ на изобретения и полезные модели.

В диссертационной работе сделаны все необходимые ссылки и отмечены результаты использования научных работ, выполненных автором лично и в соавторстве.

Все результаты, составляющие научную новизну диссертации и выносимые на защиту, получены автором лично.

### **Замечания по диссертационной работе**

По содержанию диссертационной работы имеется ряд замечаний и вопросов:

1. В диссертации рассмотрены вопросы работы синхронных генераторов на линейную активную нагрузку. Например, при оптимизации тихоходных СГППМ по критерию максимума КПД рассматривается только один частный случай активной нагрузки. Почему не рассматриваются более общие случаи? В целом, генераторы в области малой энергетики работают на выпрямительную нагрузку, которая является нелинейной и не чисто активной. Было бы полезно оценивать работу генераторов на выпрямительную нагрузку.

2. При анализе состояния и перспектив развития тихоходных синхронных машин большое внимание уделяется анализу конструкций и разработанных математических методов. На мой взгляд, следовало бы здесь дать анализ состояния и перспектив развития методов исследования синхронных машин, так как в работе выполнена большая работа по совершенствованию методов расчета тихоходных синхронных машин.

3. При разработке математического описания синхронных машин не всегда ясны допущения, принятые при исследовании. Например, при определении КПД тихоходных СГПМ по (2.25) не учитываются потери в стали, которые присутствуют в рассматриваемой СМПМ. На мой взгляд, необходимо описывать все принятые допущения в явном виде и приводить оценку их воздействия на результаты.

4. На стр. 117, в системе уравнений (2.82) представлена эквивалентная индуктивность  $L_{\Sigma}$  обмотки якоря. Однако, для исследуемого СГПМ модульного типа доля индуктивного сопротивления рассеяния в общем индуктивном сопротивлении будет значительной и этой величиной пренебрегать нельзя. В диссертации не поясняется, как будет учтена указанная индуктивность в эквивалентном значении индуктивности.

5. Классификация синхронных машин с возвратно-поступательным движением исходит из разделения их по назначению. На мой взгляд, более целесообразна классификация исходя из конструктивных или режимных особенностей (например, короткоходовые и длинноходовые), как это было сделано в работе для синхронных машин с вращательным движением.

6. Внешние характеристики СГПМ (стр. 180, рис. 4.10, 4.13, 4.19) было бы удобнее представить в относительных единицах, как на рис. 4.20. Для машин с магнитами на поверхности индуктора, приведенные характеристики довольно мягкие. Сильная зависимость выходного напряжения свидетельствует о большом индуктивном сопротивлении обмотки якоря, что, как правило, не характерно для генераторов с таким индуктором. Представленные в п.6.1 методы и система управления предназначены для СГПМ модульного типа. Однако здесь приведены только примеры осциллограмм напряжения, и не ясно насколько удастся снизить номинальное изменение напряжение генератора. Также не ясно, каким образом будет осуществляться стабилизация напряжения генераторов с общим цилиндрическим магнитопроводом при изменении нагрузки?

7. В диссертации при решении задачи оптимизации в качестве критериев оптимальности приняты максимум КПД, минимум относительных потерь, минимизация конструкции по массогабаритным показателям. Тогда для оптимизации необходимо использовать методы многокритериальной параметрической оптимизации. При этом наиболее простым является способ сведения многокритериальной задачи к однокритериальной (скалярной). Однако, из текста диссертации (глава 2) не ясен способ решения задачи оптимизации конструкции СМПМ.

8. В тексте диссертации не обсуждаются ограничения разработанных методов проектирования и расчета тихоходных СМПМ. Поэтому не ясно, насколько универсальными являются предлагаемые методологические решения. Есть ли ограничения на диапазоны изменения основных параметров рассматриваемых СМПМ? Возможно ли обобщение и применение полученных методик на другие конструкции СМПМ?



9. На мой взгляд, предложенные автором методы оптимизации тихоходных СМППМ можно было бы использовать для расчета серии машин на основе определения общего возможного диапазона параметров и энергетических характеристик разрабатываемых СМППМ.

### **Соответствие содержания диссертации паспорту научной специальности.**

Диссертация соответствует паспорту специальности 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты» и отвечает следующим пунктам паспорта специальности:

1. Разработка научных основ создания и совершенствования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов (пункт 2);
2. Разработка методов анализа и синтеза преобразователей электрической и механической энергии (пункт 3);
3. 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 (пункт 5).

### **Заключение**

Диссертационная работа Татевосяна А.А. обладает научной и практической значимостью и представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой получены новые научно-обоснованные технические решения и разработки, имеющие существенное значение для электротехнической и электроэнергетической отрасли в области создания и совершенствования тихоходных синхронных электрических машин с постоянными магнитами с целью повышения энергетической эффективности электротехнических комплексов на их основе. В диссертации представлены методы по проектированию тихоходных СМППМ предназначенных для работы в генераторных и приводных электротехнических комплексах.

Автореферат диссертации в полной мере отражает содержание работы.

Диссертация соответствует паспорту специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты» и требованиям пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней» Постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

Результаты исследований обоснованы, достоверны и апробированы на конференциях различного уровня и семинарах. Уровень и объем публикаций автора, отражающих основные полученные результаты,

соответствует требованиям пунктов 11 и 13 «Положения о присуждении ученых степеней» Постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

Представленная диссертация «Методы проектирования и разработка тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин в составе электротехнических комплексов» отвечает требованиям, установленным «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации 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,  
профессор кафедры «Электромеханика»,  
Федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Уфимский государственный авиационный  
технический университет»,  
доктор технических наук, доцент

Саттаров Роберт Радилович

Дата: «5» мая 2022 г.

Докторская диссертация защищена по специальности 05.13.05 – «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления»

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
авиационный технический университет»  
450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12.  
Тел. +7 (908)350-23-12  
e-mail: sattar.rb@gmail.com



Саттаров Р. Р.  
«05» 05 2022 г.  
Рашипов Д. Р.