

## ОТЗЫВ

официального оппонента Чермошенцева Сергея Федоровича  
на диссертационную работу Тамьяровой Майи Владиславовны  
«Повышение эффективности автоматизированного проектирования  
коллекторных электромашин на основе параметрически генерируемых  
моделей магнитного поля», представленную на соискание ученой степени  
кандидата технических наук по специальности 05.13.12 Системы  
автоматизации проектирования (электротехника и энергетика).

**1. Общие сведения.** Диссертационная работа Тамьяровой Майи Владиславовны состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 118 наименований и 2 приложений. Работа изложена на 145 страницах, содержит 61 рисунок.

### **2. Актуальность темы диссертации.**

Большой стимул к развитию отечественных программных и технических решений при создании высокотехнологичных устройств на основе научноемких производств оказала программа «импортозамещения», поэтому использование в производстве современных отечественных разработок в области САПР является актуальным и востребованным.

Кроме того, современное производство широко использует, в качестве исполнительных устройств, электрические машины. Среди них особое место, по-прежнему, занимают коллекторные машины (КМ). Это обосновано тем, что КМ имеет лучшие среди всех типов машин динамические и регулировочные свойства. Особенно популярны КМ малой мощности, используемые в бытовых приборах. Кроме того, высокая перегрузочная способность КМ позволяет им выдерживать конкуренцию и в качестве тяговых двигателей, двигателей прокатных станов и т.п. Следовательно, повышение эффективности проектирования коллекторных электромашин путем разработки более совершенных методик, позволяющих учесть особенности ее постоянно изменяющейся конструкции, является и будет являться актуальной инженерной задачей. Конструкция якоря КМ с конца XIX века принципиально не менялась. Однако возможности совершенствования конструкции статора еще не исчерпаны, что вызвано особенностями практически неподвижного относительно статора магнитного поля. Поэтому в плане перспективных направлений развития САПР КМ актуальной является задача разработки методик проектирования, позволяющих получать новые варианты конструкции статора КМ в процессе структурно-параметрической оптимизации машины. Так как данная постановка задачи предполагает появление в ходе проектирования нетиповых решений, для которых не существует апробированных методик расчета, разрабатываемая методика должна строиться на основе моделей магнитного поля, позволяющих учесть все особенности конструкции магнитной системы.

Так как преимущества КМ определяются их регулировочными

свойствами, то моделирование переходных режимов является одним из главных элементов САПР КМ. При этом необходимо учитывать влияние на динамику машины особенностей ее конструкции, что требует разработки динамических моделей КМ, основанных на полевой постановке задачи.

В связи с этим тема диссертационной работы Тамьяровой Майи Владиславовны, посвященная разработке и реализации новых подходов к решению проблемы автоматизированного проектирования коллекторных машин, несомненно, является актуальной.

### **3. Анализ содержания диссертационной работы.**

**В первой главе** проведен анализ современного состояния вопроса применения КМ в современном производстве, а также анализ существующих средств автоматизированного проектирования КМ на основе полевых и цепных моделей.

Сделан вывод о необходимости совершенствования средств автоматизированного проектирования с целью обеспечения рынка КМ отечественными разработками. Разработка специализированного программного обеспечения является неотъемлемой частью современных систем автоматизированного проектирования, что в свою очередь требует ужесточения требований к точности и быстродействию таких систем, применимых для инженерных расчетов. Подобными возможностями обладает целый спектр современных систем инженерного анализа (САЕ). Приведенные системы позволяют решить практически весь спектр инженерных задач, возникающих в настоящее время. Однако, как показано в работе, представленные САЕ системы зачастую обладают избыточным функционалом и высокой стоимостью, которая недоступна для большинства производственных предприятий мелкого и среднего уровня, осуществляющих проектирование и выпуск мелкосерийных и даже штучных КМ.

Разработанная модульная система автоматизированного проектирования позволяет избежать изложенных выше трудностей, в первую очередь, благодаря гибкой системе перестройки на нужды конкретного проектировщика, при этом сохраняется необходимая точность инженерных расчетов, но значительно увеличивается быстродействие при проектировании и проведении имитационных экспериментов, включая динамические режимы КМ.

В главе рассмотрены варианты интеграции как открытых лицензионных продуктов, так и проприетарного программного обеспечения, в зависимости от возможностей потребителя. Принято решение использовать в качестве основы проектной среды табличный процессор MSEExcel, который интегрируется с математическими пакетами, значительно расширяющие его математические возможности для анализа и синтеза математических моделей, в том числе построенных с применением метода конечных элементов, здесь особое место занимает разработанная в ИГЭУ библиотека EMLib.

Так, библиотека EMLib представляет собой DLL, поставляющую в среду программирования Visual Basic for Excel, функции для построения и анализа

результатов расчета квазистационарного магнитного поля электрических машин в нелинейной 2D-постановке. Это позволяет разрабатывать макросы Excel для автоматизации специфических проектных процедур, а также для создания комбинированных моделей, в которых результаты расчета магнитного поля играют вспомогательную роль.

Одной из задач диссертации является развитие данного подхода к моделированию динамического режима КМ и адаптация полевой динамической модели (ПДМ) к современным имитационным пакетам, что позволило бы использовать точные ПДМ КМ при моделировании электроприводов.

**Во второй главе** представлены результаты разработки многомодульной модели, позволяющие «собрать» и гибко перестроить среду разработки. К основному модулю системы следует отнести параметрический генератор, позволяющий быстро адаптировать исполнительные модули под изменяющиеся условия оптимизационного моделирования КМ.

Еще одним не маловажным звеном системы является модуль-решатель, в котором реализован один из перспективных в настоящее время оптимизационных алгоритмов – генетический алгоритм, сочетающий в себе поисковые алгоритмы традиционных систем оптимизации, но лишенных их недостатков (например, практически полностью исключено попадание в локальный минимум многокритериальной целевой функции). Разработанный в среде VBA решатель очевидно становится удобным и гибким инструментом поиска оптимальной конструкции КМ.

Упомянутый ранее параметрический генератор позволяет на этапе проектирования выполнять многократные расчеты магнитного поля КМ с учетом заданных проектировщиком параметров оптимизации, тем самым позволяет провести структурно-параметрическую оптимизацию расчетной модели.

Отдельные фрагменты моделистыстыкуются друг с другом по вертикали и по горизонтали посредством интерфейсных точек. Произвольная комбинация фрагментов позволяет получить с помощью разработанного параметрического генератора конечно-элементной модели (КЭМ) несколько десятков тысяч исполнений КМ, включая типовые и нетиповые варианты конструкции.

В отличие от ANSYS Maxwell RMxprt все варианты, в том числе нетиповые, могут быть построены одним параметрическим генератором КЭМ, что позволяет использовать его при структурно-параметрической оптимизации КМ.

Оптимизационная модель была апробирована на задаче оптимизации конструкции неявнополюсной КМ серии 4П. Получен вариант машины с усечением спинки статора и неравномерными пазами, дающий 23% экономии электротехнической стали. Допущения: равенство с исходным вариантом плотностей тока в пазах статора и индукции в зоне коммутации.

**В третьей главе** приведены результаты разработки методики построения и исследования полевых динамических моделей КМ с использованием

современных имитационных пакетов.

В четвертой главе представлены результаты разработки методики анализа и синтеза КМ, в основе которой лежат две разработанные модели: оптимизационная, позволяющая осуществлять структурно-параметрическую оптимизацию КМ с использованием параметрического генератора КЭМ, и ПДМ КМ, позволяющая имитировать работу КМ нетиповой конструкции в различных режимах работы.

Методика включает в себя следующие этапы:

1. Выбор типового аналога или его расчет по инженерной методике.
2. Построение КЭМ аналога.
3. Анализ вариантов конструкции КМ.
4. Формулировка и решение задачи структурно-параметрической оптимизации КМ с учетом выявленных перспектив.
5. Расчет статических характеристик КМ на полевой модели.
6. Обучение ПДМ КМ на модели магнитного поля.
7. Исследование обученной ПДМ КМ в различных режимах работы, анализ результатов, выявление недостатков конструкции, совершенствование конструкции, корректировка КЭМ с учетом полученных результатов, повторное обучение и исследование ПДМ.

Апробация методики структурно-параметрической оптимизации КМ выполнена на примере машины серии 4П80.

В результате оптимизации получен вариант, дающий экономию электротехнической стали на 39,4% по сравнению с аналогом и 34,9% экономию меди в обмотках статора без учета обмотки якоря. Машина имеет прорези по осям полюсов и облегченную компенсационную обмотку, позволяющие получить удовлетворительные условия в зоне коммутации как в номинальном режиме, так и при пуске на номинальную нагрузку.

Таким образом, разработанная методика и разработанные модели позволили осуществить синтез и анализ КМ нетиповой конструкции. Данная методика может быть использована как на стадии оптимизации КМ, так и на стадии НИОКР.

На защиту выносятся разработанная автором методика анализа и синтеза КМ нетиповой конструкции на основе использования полевых моделей на стадии оптимизации и анализа режимов работы спроектированного устройства, результаты их исследования и практической реализации.

#### **4. Научная новизна** полученных результатов заключается:

- в разработке методики проектирования коллекторных электрических машин нетиповой конструкции, отличающейся использованием параметрически генерируемых моделей магнитного поля как на стадии поиска оптимального варианта, так и на стадии поверочного расчета, осуществляемого в форме имитационного эксперимента;
- в разработке оптимизационной модели коллекторной электрической машины на основе модели квазистационарного магнитного поля, отличающейся способом построения целевой функции с использованием

параметрического генератора полевой модели, позволяющего осуществлять программируемые деформации расчетной области, решая таким образом задачу структурно-параметрического синтеза коллекторной машины с использованием генетических алгоритмов;

- в разработке методики построения полевых динамических моделей коллекторных электрических машин, в том числе, нетиповой конструкции, отличающейся быстродействием, характерным для цепных моделей при сохранении точности полевых моделей, а также возможностью их интеграции в модели автоматизированного электропривода, реализуемые с помощью современных программных комплексов.

## **5. Обоснованность корректности решений и достоверности научных результатов, выводов и рекомендаций.**

Корректность решения поставленных задач и обоснованность полученных результатов, выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертационной работе Тамьяровой М.В., обеспечивается корректным применением методов теории САПР, теории цепей и теории магнитного поля, в частности, метода конечных элементов, методов анализа переходных процессов в нелинейных электрических цепях, методов оптимизации, в частности, генетических алгоритмов, а также методов физического моделирования на экспериментальном лабораторном оборудовании. Достоверность научных результатов и выводов подтверждается также близостью результатов теоретических исследований и результатов моделирования на экспериментальном оборудовании.

**6. Практическая значимость** диссертационной работы Тамьяровой М.В. определяется следующим:

- на базе MSEExcel разработана управляющая подсистема САПР КМ, позволяющая интегрировать приложения и математические модели в рамках единой проектно-исследовательской среды. На данной основе разработана версия проектно-исследовательской среды КМ.

- на базе MSEExcel и библиотеки моделирования магнитного поля EMLib разработан параметрический генератор конечно-элементной модели коллекторной машины нетиповой конструкции.

- на базе MSEExcel и MatLab разработана подсистема оптимизации КМ, позволяющая формулировать и решать с использованием генетических алгоритмов задачи структурно-оптимизационного синтеза КМ.

- на базе MSEExcel и MatLab Simulink разработана подсистема формирования и анализа полевой динамической модели КМ.

- на основе разработанной проектно-исследовательской среды проведен поиск и анализ оптимальной структуры КМ.

Результаты диссертации Тамьяровой М.В. использовались при выполнении НИР при проектировании КМ нетиповой конструкции, а также в учебном процессе Ивановского государственного энергетического университета и Ульяновского государственного технического университета.

**7. Публикации.** По теме диссертации опубликована 21 работа, в том

числе 4 статей в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ. Получено одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

### **8. Оценка содержания и оформления диссертации.**

Диссертационная работа написана технически грамотным языком. Корректность изложения научного материала, наглядная иллюстрация полученных результатов и их интерпретация позволяют объективно оценить содержание, результаты, научную и практическую значимость проведенного научного исследования. Оформление диссертации соответствует установленным требованиям.

Все основные научные и практические результаты в достаточном объеме опубликованы автором в печатных изданиях, рекомендованных ВАК РФ и апробированы на Международных и национальных научно-технических конференциях.

Работа соответствует специальности 05.13.12 «Системы автоматизации проектирования» и ее области исследований, поскольку отражает вопросы использования современных методов моделирования, инженерного анализа и интеграции САПР в общую архитектуру автоматизированной проектно-производственной среды, методологию автоматизированного проектирования в технике, включая постановку, формализацию и типизацию проектных процедур и процессов проектирования, вопросы выбора методов и средств для применения в САПР, разработка и исследование моделей, алгоритмов и методов для синтеза и анализа проектных решений.

Автореферат диссертации полностью отражает основное содержание диссертационной работы.

### **9. Замечания по работе.**

1. В работе широко применяется термин «нетиповая конструкция», при этом кроме формы сечения статора отсутствует описание других «нетиповых элементов» коллекторной машины.

2. При построении оптимизационной модели может ли изменяться размерность вектора варьируемых параметров, например, в случае обнаружения малозначимых конструкционных изменений на свойства коллекторной машины?

3. Возможно ли применение алгоритмов обучения нейронных сетей к оптимизационным расчетам коллекторных машин?

4. Анализировалась ли разреженность матриц КЭМ и увеличение времени обработки информации из-за наличия нулевых элементов в матрицах.

5. Не совсем понятна ценность «полевой динамической модели» коллекторной машины при ее моделировании.

Несмотря на высказанные замечания, диссертационная работа Тамьяровой М.В. является завершенной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной научной задачи проектирования коллекторных машин путем разработки и использования математических

моделей для анализа и синтеза проектных решений на основе современных компьютерных технологий.

Диссертация обладает технической и практической значимостью, внутренним единством, содержит новые научные результаты, выдвигаемые для публичной защиты, соответствует требованиям предъявляемым ВАК России к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, в том числе п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (с изменениями от 21.04.2016 г. №335), а ее автор Тамьярова Майя Владиславовна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.12 – Системы автоматизации проектирования (электротехника и энергетика).

Официальный оппонент доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Системы автоматизированного проектирования» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ» КНИТУ-КАИ,  
ул. К. Маркса 10, г. Казань, 420111  
Тел.:8(843)238-41-10 E-mail: sapr@kai.ru

Подпись профессора  
Чермошенцева С.Ф. удостоверяю:

Чермошенцев С. Ф./

Ученый секретарь КНИТУ-КАИ

*Жестковская Ф. А./*

