



СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»**
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

ул. Профессора Попова, д.5, Санкт-Петербург, 197376
Телефон: (812) 234-46-51; факс: (812) 346-27-58; e-mail: info@etu.ru; <https://etu.ru>
ОКПО 02068539; ОГРН 1027806875381; ИНН/КПП 7813045402/781301001

УТВЕРЖДАЮ

заместитель директора департамента науки
Федерального государственного
автономного образовательного учреждения
высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Гайворонский Дмитрий

«17» *сентя*

14

г.

О Т З Ы В

ведущей организации по диссертации Тамьяровой М.В. «Повышение эффективности автоматизированного проектирования коллекторных электромашин на основе параметрически генерируемых моделей магнитного поля», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.12. – Системы автоматизации проектирования (электротехника, энергетика).

Актуальность темы диссертации

В плане перспективных направлений развития САПР коллекторных машин (КМ) актуальной является задача разработки методик проектирования, позволяющих получать новые варианты конструкции этих машин, в частности статора коллекторных машин 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.

При этом необходимо учитывать влияние на динамику машины особенностей ее конструкции, что требует динамических моделей коллекторных машин, основанных на полевой постановке задачи.

На большинстве предприятий функционируют «кустарные» элементы систем автоматизации проектирования собственной разработки. При попытке интегрировать их в крупные программные продукты обычно возникают проблемы. В этой связи решаемая в рамках рецензируемой работы задача разработки и развития компонентной технологии создания подсистем САПР КМ является актуальной задачей.

Цель работы

Цель работы сформулирована как повышение эффективности автоматизированного проектирования КМ путем разработки и использования математических моделей для анализа и синтеза проектных решений на основе современных компьютерных технологий. Для достижения данной цели автор занимался не только разработкой самих моделей, но и ориентировался на их программную реализацию с использованием открытых программных средств, которые могут быть интегрированы в другие приложения. При этом автор ориентировался на создание элементов САПР, в которых отсутствовали бы недостатки существующих на рынке программных продуктов.

Обзор содержания работы и сделанных выводов

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 118 наименований, и приложения, содержащего три акта внедрения и одно свидетельство на программный продукт.

Во введении обоснована актуальность темы, определены цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость результатов работы.

В первой главе рассмотрено современное состояние проблемы анализа и синтеза КМ, в частности, особенности конструкции КМ, средства автоматизации проектирования, численные модели, используемые для решения задач и синтеза КМ. Особое внимание обращено на моделирование магнитного поля, методы оптимизации, модели режимов работы КМ, в том числе, основанные на результатах полевых расчетов.

Подчеркнуто, что учет особенностей неподвижного относительно индуктора магнитного потока может привести к нетиповым решениям, для которых отсутствуют апробированные инженерные методики расчета. Выход в таких случаях

ищется в использовании новых моделей магнитного поля. Дан обзор систем инженерного анализа (CAE), используемых в качестве инструментальной базы при проектировании КМ, позволяющих осуществить расчет физических полей и цепей, чаще всего, методом конечных элементов.

Принято решение использовать в качестве основы проектной среды табличный процессор MSExcel, который интегрируется с математическими пакетами, расширяющими его возможности, такими как MatLab или его свободно распространяемый аналог SciLab, а также со свободно распространяемыми библиотеками расчета физических полей, такими как EMLib (разработка ИГЭУ).

Во второй главе приведены результаты разработки и апробации модели для решения задачи синтеза КМ. Ядром данной модели является модуль параметрического генератора конечно-элементной модели (ПГ КЭМ) магнитного поля КМ по заданному набору входных параметров, определяющих конструктивное исполнение машины, а также модуль расчета данной модели, передающий результаты расчета в модуль формирования целевой функции.

Решатель подсистемы оптимизации представляет собой разработанный в ИГЭУ VBA-макрос, реализующий генетический алгоритм, основанный на островной модели с несколькими параллельно развивающимися популяциями в комбинации с методом Нелдера-Мида, более точно доводящим найденное решение до оптимума.

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

В третьей главе приведены результаты разработки методики построения и исследования полевых динамических моделей (ПДМ) КМ с использованием современных имитационных пакетов.

Разработанные ПДМ КМ по скорости вычислений не уступают упрощенным цепным моделям. В то же время возможность учета особенностей конструкции машины соответствует понятию полевой модели, что позволяет использовать их при исследовании динамики КМ нетиповой конструкции. В частности, на рис. 11,а приведена оригинальная модель КМ. Анализ ПДМ показал неустойчивость ее динамики (рис. 11,б). Именно для этих целей разрабатывалась ПДМ КМ, которая уже на стадии проектирования КМ способна выявить подобные конструкторские ошибки.

В четвертой главе представлены результаты разработки методики анализа и синтеза КМ, в основе которой лежат две разработанные модели: исходная,

позволяющая осуществлять структурно-пара-метрическую оптимизацию КМ с использованием ПГ КЭМ, и ПДМ КМ, позволяющая имитировать работу КМ нетиповой конструкции в различных режимах работы.

В результате оптимизации получен вариант, дающий 39,4% экономии электротехнической стали по сравнению с аналогом и 34,9% экономии меди в обмотках статора без учета ОЯ. Машина имеет прорези по осям полюсов и облегченную КО, 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.

Научная новизна

Научная новизна в диссертации сформулирована в следующих пунктах:

1) Разработана методика проектирования коллекторных электрических машин нетиповой конструкции, отличающаяся использованием параметрически генерируемых моделей магнитного поля.

2) Разработана модель коллекторной электрической машины на основе модели квазистационарного магнитного поля, отличающаяся способом построения целевой функции с использованием параметрического генератора полевой модели.

3) Разработана методика построения полевых динамических моделей коллекторных электрических машин, в том числе нетиповой конструкции, отличающаяся быстродействием, характерным для цепных моделей при сохранении точности полевых моделей.

Значимость для науки и производства полученных автором результатов

Разработанные в рамках работы модели и средства могут быть использованы при проектировании коллекторных машин для организации численного эксперимента. Большую значимость имеет тот факт, что созданные библиотеки и программы могут применяться независимо друг от друга, а так же дорабатываться под конкретные задачи. Особый интерес здесь представляет платформонезависимая версия библиотеки конечно-элементного моделирования магнитного поля. Ее использование позволяет добавить возможность расчета поля в любую программу, допускающую использование внешних компонентов.

Обоснованность и достоверность результатов работы

Об обоснованности и достоверности результатов работы можно судить по представленному в работе сравнению полученных результатов с опытными данными, а также с имеющимися на рынке системами. Так же важным является тот факт, что по результатам работы получено свидетельство на программный продукт и три акта внедрения.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Разработанные программные продукты рекомендуются к использованию в связке с уже существующими на предприятии системами для расширения их функционирования. Библиотека конечно-элементного расчета поля и средства параметрической генерации конечно-элементных моделей могут быть рекомендованы к отдельному использованию для создания компактной системы решения полевых задач.

Замечания по работе

1. Упрощенные математические модели, применяемые в работе, требуют более детального обоснования. Так в работе не представлено обоснование того, что расчёт, построенный на основе картины магнитного поля, имеет более высокую точность по сравнению с расчетом по цепной модели КМ. Недостаточно обоснован выбор метода аппроксимации магнитного поля многомерными сплайнами или многомерной кусочно-линейной функцией. При симметричности коллекторной машины не совсем понятно, почему при вращении якоря выполняется полностью перетриангуляция зазора на каждом шаге.

2. При построении ПДМ по паспортным данным предлагается использовать принципы теории подобия, однако, ее применение ограничено случаями, когда обе машины имеют одинаковое конструктивное исполнение.

3. Решение задач на этапе конструкторского проектирования вызывает следующие замечания:

а) усложнение конструктивных элементов КМ может привести к значительному возрастанию индукции в местах разрыва магнитного сцепления статора с ротором и, как следствие, возникновение механической напряженности в металле (данных эффект наблюдается, например, в индукторных машинах);

б) при изменении параметров ПГ КЭМ КМ строит различные варианты исполнения КМ. Остается неясным имеются ли возможности предложения рекомендаций инженеру-проектировщику по конструктивному изменению КМ (например, рекомендация по пропуску паза или изменению глубины какого-либо паза), или этот функционал возлагается на него, на основе полученной картины магнитного поля.

в) при оптимизации размеров пазов статора КМ предлагается использовать при раскрые электротехнической стали разноразмерные пазы. При этом возникает

вопрос как скажется разная величина глубин пазов на укладке обмоток (усложнит ли это технологию укладки обмоток, понадобится ли проектирование клиньев разных размеров и т.п.). Не обоснован выбор шага угла поворота ротора (альфа) при проведении серии предварительных расчетов магнитного поля для расчета картины поля.

4. Имеются редакционные замечания: неудачный термин «оптимизационные модели», запись функционала.

Указанные замечания не меняют общей оценки работы.

Заключение по работе

Диссертация Тамьяровой М.В. «Повышение эффективности автоматизированного проектирования коллекторных электромашин на основе параметрически генерируемых моделей магнитного поля» отвечает требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», в частности, пунктов 9-14, утвержденного правительством РФ от 24.09.2013г. №842 и может быть оценена положительно. Соискатель Тамьярова Майя Владиславовна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.12 – Системы автоматизации проектирования (электротехника, энергетика).

Диссертационная работа Тамьяровой Майи Владиславовны и отзыв на нее обсуждены на расширенном заседании кафедры Системы автоматизации проектирования федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», протокол №6 от 17 сентября 2019года.

Заведующий кафедрой САПР,
кандидат технических наук,
доцент

Профессор кафедры САПР,
доктор технических наук,
профессор

Рыжов
Николай Геннадьевич

Сольнищев
Ремир Иосифович

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5

Телефон +7(812) 234-36-75

Электронная почта saprftki@mail.ru