ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ИВАНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ имени В.И. Ленина»

Mary

На правах рукописи

ТАМЬЯРОВА Майя Владиславовна

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОЛЛЕКТОРНЫХ ЭЛЕКТРОМАШИН НА ОСНОВЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИ ГЕНЕРИРУЕМЫХ МОДЕЛЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

05.13.12 - Системы автоматизации проектирования

(электротехника, энергетика)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

д-р техн. наук, проф. Тихонов А.И.

Иваново – 2019

Содержание

	Введение	4
1.	Современное состояние проблемы анализа и синтеза	11
	коллекторных электрических машин в теории САПР	
1.1.	Особенности конструкции коллекторных электрических машин	11
1.2.	Средства автоматизации проектирования коллекторных машин	15
1.3	Численные модели для решения задач анализа и синтеза	19
	электрических машин	
1.3.1.	Моделирование магнитного поля в электрических машинах	19
1.3.2.	Методы и средства для решения задачи поиска оптимального	24
	решения при проектировании электрических машин	
1.3.3.	Моделирование режимов работы КМ	26
	Выводы по первой главе и постановка задачи	34
2.	Разработка оптимизационной модели для решения задачи	37
	синтеза коллекторной машины	
2.1.	Теоретическое обоснование структуры оптимизационной	37
	модели коллекторной машины	
2.2.	Разработка генератора полевых моделей коллекторных	41
	электрических машин	
2.2.1.	Декомпозиция и алгоритм построения расчетной области КМ	41
2.2.2.	Разработка и апробация подсистемы параметрической	48
	генерации конечно-элементной модели КМ	
2.3.	Программная реализация и апробация оптимизационной	55
	модели коллекторной машины	
	Выводы по второй главе	61
3.	Разработка методики построения и исследования полевых	63

динамических моделей для решения задач анализа коллекторных машин

3.1.	Адаптация полевой динамической модели коллекторной	63
	машины к имитационным пакетам	
3.2.	Методика обучения полевой динамической модели	70
	коллекторной машины	
3.3.	Методика расчета параметров динамических моделей	75
	коллекторных машин по паспортным данным	
3.4.	Апробация полевой динамической модели коллекторной	80
	машины	
3.4.1.	Полевая динамическая модель УКД	80
3.4.2.	Полевая динамическая модель неявнополюсного ДПТ	84
3.4.3.	Полевая динамическая модель ДПТ нетиповой конструкции	86
	Выводы по третьей главе	89
4.	Разработка методики анализа и синтеза проектных решений в	91
	САПР коллекторных машин	
4.1.	Основные положения методики анализа и синтеза проектных	91
	решений в САПР КМ и структура проектно-исследовательской	
	среды в составе САПР КМ	
4.2.	Апробация методики анализа и синтеза проектных решений в	100
	САПР коллекторных машин	110
	Выводы по четвертой главе	
	Заключение	112
	Библиография	115

Принятые обозначения

- 1. ГА генетический алгоритм
- 2. ДПТ двигатель постоянного тока
- 3. КЗ короткое замыкание
- 4. КМ коллекторная машина
- 5. КО компенсационная обмотка
- 6. КЭ конечно-элементный
- 7. МКЭ метод конечных элементов
- 8. КЭМ конечно-элементная модель
- 9. МП магнитное поле
- 10. МПТ машина постоянного тока
- 11. НИОКР научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы
- 12. НС намагничивающая сила
- 13. ОВ обмотка возбуждения
- 14. ОДП обмотка добавочных полюсов
- 15. ОДУ обыкновенные дифференциальные уравнения
- 16. ОЯ обмотка якоря
- 17. ПДМ полевая динамическая модель
- 18. ПГ параметрический генератор
- 19. САПР система автоматизированного проектирования
- 20. СО сериесная обмотка
- 21. УКД универсальный коллекторный двигатель
- 22. ЭДС электродвижущая сила
- 23. CAE Computer-aided engineering
- 24. VBA Visual Basic for Application

Введение

Актуальность темы диссертации.

Конструкция коллекторной машины (КМ) или машины постоянного тока (МПТ), содержащей ненадежный в эксплуатации щеточно-коллекторный узел, постоянно подвергается критике. В то же время 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. Поэтому 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. Проблемой разработки САПР электрических машин (ЭМ) занимались многие научные школы СССР и РФ. Значительный вклад в развитие теории САПР ЭМ внесли российские ученые Д.А. Аветисян, Ю.Б. Бородулин, А.Г. Иосифьян, И.П. Копылов, Э.Д. Кравчик, Б.И. Кузнецов, С.И. Маслов, И.П. Норенков, И.Н. Орлов, И.М. Постников, Э.Л. Стрельбицкий, Т.Г. Сорокер, А.А. Терзян, В.А. Трапезников, И.Н. Чарахчьян и др.

В плане подходов к созданию САПР КМ данная диссертация продолжает традиции Ивановской школы, в частности, в русле работ Ю.Б. Бородулина, Г.В. Попова, Ю.Я. Щелыкалова, Ю.Б. Казакова, А.И. Тихонова. Особый акцент делается на поиске оптимальной конструкции и моделировании динамики ЭМ, в том числе, с использованием моделей магнитного поля.

Работа выполнялась в Ивановском государственном энергетическом университете имени В.И. Ленина.

<u>Цель работы</u> заключается в повышении эффективности автоматизированного проектирования коллекторных машин путем разработки и использования математических моделей для анализа и синтеза проектных решений на основе современных компьютерных технологий.

Задачи, решаемые в диссертации:

1. Разработка параметрического генератора, позволяющего автоматизировать построение полевых моделей КМ произвольной конструкции.

2. Разработка оптимизационной модели, позволяющего решать задачи структурно-параметрической оптимизации КМ.

3. Разработка полевой динамической модели КМ и подсистемы моделирования произвольных режимов работы КМ нетиповой конструкции на основе существующих имитационных пакетов.

4. Разработка структуры проектно-исследовательской среды в составе САПР КМ. Интеграция разработанных моделей и приложений в единую проектно-исследовательскую среду.

5. Поиск оптимального варианта структуры КМ с использованием инструментов разработанной САПР.

Соответствие паспорту специальности. Работа соответствует паспорту специальности: в части формулы специальности 05.13.12: «Системы автоматизации проектирования – специальность, занимающаяся проблемами создания и повышения эффективности функционирования систем автоматизированного проектирования, управления качеством проектных работ на основе использования современных методов моделирования и инженерного анализа ... и интеграции САПР в общую архитектуру автоматизированной проектно-производственной среды. Специальность включает принципы и методы, отличающиеся тем, что они содержат разработку и исследования научных основ проектирования, построения и функционирования интегрированных интерактивных комплексов анализа и синтеза проектных решений и систем создания проектной ... документации на изготовление, испытание и эксплуатацию сложных технических объектов, образцов новой техники и технологий». В части области исследования специальности 05.13.12 – *пункту 1*: «Методология автоматизированного проектирования в технике, включая постановку, формализацию и типизацию проектных процедур и процессов проектирования, вопросы выбора методов и средств для применения в САПР»; <u>пункту 2</u>: «Разработка научных основ создания систем автоматизации проектирования ...»; *пункту 3*: «... разработка и исследование моделей, алгоритмов и методов для синтеза и анализа проектных решений».

<u>Методы исследования.</u> Использованы методы теории САПР, теории цепей и теории магнитного поля, в частности, метод конечных элементов, методы анализа переходных процессов в нелинейных электрических цепях, методы оптимизации, в частности, генетические алгоритмы.

Научная новизна.

1. Разработана методика проектирования коллекторных электрических машин нетиповой конструкции, *отличающаяся* использованием параметрически генерируемых моделей магнитного поля как на стадии поиска оптимального варианта, так и на стадии поверочного расчета, осуществляемого в форме имитационного эксперимента.

2. Разработана оптимизационная модель коллекторной электрической машины на основе модели квазистационарного магнитного поля, *отличающаяся* 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.

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, а также возможностью их интеграции в модели автоматизированного электропривода, реализуемые с помощью современных имитационных комплексов.

<u>Практическая значимость</u> результатов работы состоит в следующем:

1. На базе табличного процессора MSExcel 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.

2. На базе MSExcel и библиотеки моделирования магнитного поля EMLib разработан параметрический генератор конечно-элементной модели коллекторной машины нетиповой конструкции.

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

4. На базе MSExcel и MatLab Simulink разработана подсистема формирования и анализа полевой динамической модели КМ.

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

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается использованием апробированных методов математического мо-

8

делирования, сравнением результатов расчета с результатами, полученными на апробированных моделях и экспериментальной установке.

Реализация результатов работы. Результаты работы внедрены в производственный процесс в ООО «Трансформер» (г. Подольск), а также в учебный процесс на кафедре ИВК УлГТУ (г. Ульяновск) и на кафедре электромеханики ИГЭУ (г. Иваново).

Реализация результатов работы подтверждена актами внедрения.

Автор защищает:

- методику анализа и синтеза КМ нетиповой конструкции на основе использования полевых моделей на стадии оптимизации и анализа режимов работы спроектированного устройства, а также структуру проектноисследовательской среды, позволяющей решать задачи анализа и синтеза КМ.

 параметрический генератор конечно-элементной модели магнитного поля КМ нетиповой конструкции;

 оптимизационную модель, позволяющую решать задачи структурнопараметрического синтеза КМ с использованием полевых расчетов;

- быстродействующую полевую динамическую модель КМ, реализованную средствами современных имитационных пакетов.

Личный вклад автора состоит в разработке математического аппарата параметрического генератора полевой модели КМ, оптимизационной и полединамической модели КМ, в разработке структуры вой проектноисследовательской среды для решения задач анализа и синтеза КМ, в участии разработке программного обеспечения В И отладке проектноисследовательской среды, в частности, параметрического генератора полевой КМ нетиповой модели конструкции, подсистемы структурнопараметрической оптимизации КМ, подсистемы формирования полевой динамической модели и анализа режимов работы КМ, управляющей подсистемы САПР КМ, а также в проведении численных экспериментов и разработке рекомендаций по совершенствованию конструкции КМ.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на конференциях: «Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования)» (XXVI международная конференция, МЭИ, г. Москва, 2018 г.); «Теория и практика имитационного моделирования и создания тренажеров» (Международная научно-практическая конференция, ПГТУ, г. Пенза, 2016 г.); «Актуальные проблемы информатизации науки и производства» (XIII Международная научно-практическая конференция, ВУиТ, г. Тольятти, 2016 г.); «Эффективные системы менеджмента: качество, инновации, устойчивое развитие» (VI Международный научно-практический форум, г. Казань, 2017 г.); «Современное состояние, проблемы и перспективы энергетики и технологии в энергостроении» (Международня научно-техническая конференция XIX Бенардосовские чтения, г. Иваново, ИГЭУ, 2017 г.); 18-я Международная Плесская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям (ИГЭУ, г. Иваново, 2018); 10-я Международная конференция по системам электропривода (ICEPDS, г. Новочеркасск, 2018); «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов, г. Москва, МЭИ, 2017 г.); на международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Энергия» (г. Иваново, ИГЭУ, 2017, 2018 гг.); «21 century: fundamental science and technology X Proceedings of the Conference (заочная конференция, н.-и. ц. «Академический», North Charleston, USA, 2016 г.).

Публикации. По результатам работы опубликованы 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, 13 статей в периодических изданиях, сборниках статей и материалов конференций, 2 тезисов докладов, 1 методические указания, 1 свидетельство на программный продукт.

<u>Структура и объем диссертации.</u> Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 118 наименований, и приложения. Основная часть работы изложена на 128 страницах и содержит 61 иллюстрацию.

1. Современное проблемы анализа и синтеза коллекторных электрических машин в теории САПР

1.1. Особенности конструкции коллекторных электрических машин

Под коллекторными машинами (КМ) понимается электрическая машина, на якоре которой установлен коллектор – механический коммутатор [16, 17, 89]. Различают КМ постоянного тока и КМ переменного тока. В свою очередь КМ переменного тока делятся на однофазные и многофазные. Ввиду того, что многофазные КМ (в основном это двигатели Шраге-Рихтера) в настоящее время практически не используются, эти машины в данной диссертации не рассматриваются.

Так как однофазные КМ переменного тока могут работать как на переменном токе, так и на постоянном, то такую машину часто называют универсальным коллекторным двигателем (УКД) [21]. При этом конструктивно УКД можно рассматривать как частный случай КМ постоянного тока (МПТ) с последовательным возбуждением и шихтованным индуктором. В общем случае КМ имеет нешихтованный или шихтованный явнополюсный или неявнополюсный неподвижный индуктор (статор), на котором могут размещаться параллельная обмотка возбуждения (ОВ), последовательная (сериесная) обмотка возбуждения (СО), компенсационная обмотка (КО) и обмотка добавочных полюсов (ОДП).

Обмотка якоря (ОЯ) размещена в пазах якоря (ротора), при вращении которого отдельные секции ОЯ переключаются (коммутируют) с помощью коллектора из одной параллельной ветви ОЯ в другую. При этом общее магнитное поле КМ оказывается неподвижным в пространстве относительно статора. В этом состоит одна из главных особенностей КМ, благодаря которой при разработке конструкции индуктора достигаются существенные преимущества по сравнению с аналогами. Так, помимо традиционной явнополюсной конструкции (рис. 1.1, а) [69], МПТ может иметь неявнополюсную конструкцию (рис. 1.1, б). Внешняя поверхность статора здесь имеет форму цилиндра. Однако, например, в форсированных машинах серии 4ПФ сечение статора имеет удобную для встраивания в станки с числовым программным управлением форму квадрата (рис. 1.1, в) [69]. Еще больше разных исполнений имеют УКД малой мощности (например, рис. 1.1, г).





Рис. 1.1. Явнополюсная (а) и неявнополюсная (б) МПТ; форсированная МПТ (в); универсальный коллекторный двигатель (г)

в)

г)

Якорь (ротор) всех этих машин имеет принципиально одинаковую форму. Отличается только форма и количество пазов, а также типы обмотки, проводников, коллектора и т.п. Конструкция якоря, как правило, обладает симметрией с периодом, равным зубцовому делению. При этом якорь вращается относительно неподвижного магнитного поля. При конструировании индуктора также стремятся к симметрии, но с периодом, равным полюсному делению. Неподвижность магнитного поля относительно индукции позволяет учесть в конструкции особенности путей замыкания силовых линий. Например, распределенность магнитного потока в неявнополюсной МПТ (рис. 1.2, а) приводит к идее усечения спинки статора для выравнивания магнитной нагрузки отдельных участков магнитопровода (рис. 1.2, б) [70].



a)

б)

Рис. 1.2. Магнитное моле в неявнополюсной МПТ традиционной конструкции (a) и в машине с усеченным статором (б)

Особой проблемой КМ является проблема коммутации, приводящей к искрению на коллекторе под щетками при работе машины под нагрузкой. Искрение возникает, если в коммутирующих секциях наводится ЭДС. В МПТ это происходит, например, когда магнитное поле ОВ искажается полем ОЯ (реакция якоря) и индукция в зоне коммутации оказывается отличной от нуля. Имеется множество традиционных способов борьбы с реакцией якоря, которые отражаются в конструкции машины (установка добавочных полюсов, компенсационная обмотка, увеличение зазора, в том числе по краям полюсов и т.п.). Однако имеется также и множество нетиповых способов, основанных на увеличении магнитного сопротивления на пути потока реакции якоря, предложенных разными изобретателями, например, рис. 1.3 [5, 95, 99 и т.п.]



Рис. 1.3. Нетиповые элементы конструкции статора МПТ

Таким образом, одной из актуальных задач, возникающих при проектировании и производстве КМ, является задача поиска оптимальной конструкции статора, которая может содержать нетиповые элементы. Конкретный набор данных элементов зависит от особенностей распределения магнитного поля в статоре, особенностей эксплуатации проектируемого устройства, особенностей согласования его с другими элементами электропривода и т.п. Решению этих задач посвящена данная диссертация.

1.2. Проблема автоматизации проектирования коллекторных машин

Проблема автоматизированного проектирования КМ является частной проблемой общей теории САПР. Теоретические основы САПР электротехнических устройств изложены в [22, 36, 40, 48], в том числе с учетом мирового опыта [22, 41]. Конкретно САПР электромеханических устройств посвящены, в частности, работы [1, 2, 51]. Конкретно опыт Ивановской школы САПР под руководством Ю.Б. Бородулина, традиции которой продолжает данная диссертация, отражен, в частности, в работах [7, 8, 9].

Следует отметить, что создание полноценной САПР КМ, аналогичной, например, системе СПРУТ АД [116] для проектирования асинхронных машин, является масштабной задачей, которая, как правило, не под силу предприятиям малого и среднего бизнеса. Тем не менее, элементы САПР, основанные, в первую очередь, на типовых инженерных методиках расчета, имеются на каждом предприятии, специализирующихся на выпуске КМ.

В основе инженерных методик проектирования КМ лежат исследования, вошедшие в обобщенном виде в различные пособия [7, 18, 60 и др.]. Особенно отличаются разнообразием методики проектирования электрических машин малой мощности, что вызвано в первую очередь разнообразием их конструктивных исполнений [21, 43, 44]. Конкретно расчету коллекторных машин малой мощности посвящены работы [46, 102]. Каждое предприятие, специализирующееся на выпуске КМ, так или иначе, опирается на эти методики, но с учетом собственного накопленного опыта.

Одной из особенностей инженерных методик проектирования электрических машин является тот факт, что они строятся, главным образом, на основе моделей установившихся режимов работы. Учет особенностей динамических режимов работы осуществляется путем рекомендаций, разработанных на основе анализа прошлого опыта производства. Однако в случае машин нетиповой конструкции выполнение данных рекомендаций часто оказывается недостаточным. Здесь требуются дополнительные исследования работы машины в различных режимах работы, в том числе динамических, особенно при работе машины в составе автоматизированного электропривода [64, 82, 75]. Поэтому одной из необходимых подсистем современных САПР является подсистема имитации динамических и установившихся режимов работы проектируемого устройства с учетом особенностей конструкции машины.

Обычно традиционные инженерные методики проектирования строятся либо на основе теоретически обоснованных формул, либо на эмпирических или полуэмпирических закономерностях, часто представленных в виде таблиц, графиков, рекомендаций и т.п. Существенное влияние на расчеты оказывают требования различных стандартов и технических условий.

Практически все традиционные методики проектирования КМ, разработанные в XX веке, строятся на основе теории магнитных цепей, которые рассчитываются по средней силовой линии магнитного поля с учетом поправочных коэффициентов, отражающих особенности конструкции машины.

Прогресс в области компьютерных технологий привел к тому, что создание собственной наукоемкой расчетной системы может позволить себе даже предприятие с относительно малым доходом. В качестве аддитивного элемента функционирования разрабатываемого комплекса можно использовать различные среды разработки, в том числе и визуальные. Проведя анализ существующих средств разработки принято решение использовать табличный процессор MSExcel, позволяющий разгрузить разработчика САПР от многих операций нетворческого характера, предоставляющий разработчику удобный табличный интерфейс и среду программирования на языке VBA, которую способен освоить любой инженер. Для реализации расчетных процедур и наукоемких математических моделей целесообразно использовать математические пакеты, обменивающиеся данными с базовой средой проектирования. Лучшим в этом плане является математический процессор Mat-Lab, обеспечивающий проектировщика полным набором средств инженерной математики. Правда, стоимость коммерческой лицензии MatLab достаточно высока. Однако существуют аналоги MatLab с открытой лицензией. В частности, в качестве математического ядра разрабатывемой САПР КМ возможно применение также свободно распространяемый математический пакет SciLab, функционал которого незначительно ниже, чем функционал MatLab.

Следует отметить, что в условиях мелкосерийного или штучного производства выполнение предварительной НИОКР зачастую оказывается экономически неэффективным. В то же время ввиду разнообразия номенклатуры выпускаемой продукции традиционных инженерных методик зачастую оказывается недостаточно. Поэтому одним из необходимых элементов современных САПР всех электрических машин является наличие подсистемы, осуществляющей инженерный анализ проектируемого устройства с использованием методов расчета физических полей. В частности, для проектирования электрических машин определяющую роль имеет знание точной картины магнитного поля.

Для решения подобных задач на рынке программной продукции присутствует целый спектр систем инженерного анализа – САЕ-систем (Computeraided engineering), осуществляющих расчет физических полей чаще всего методом конечных элементов. В частности, в области электромеханики наибольшую популярность в России приобрели пакеты ANSYS Maxwell, COMSOL Multiphysics, ElCut. Одним из наиболее мощных инструментов инженерного анализа электрических машин является пакет ANSYS Maxwell, позволяющий решить практически весь спектр задач проектирования, предоставляя проектировщику удобный интерфейс, а также средства для параметризации модели и автоматизации расчетов [37].

Однако приобретение коммерческой лицензии на пакет ANSYS Maxwell (как и другие развитые CAE-пакеты) предприятия среднего и малого бизнеса позволить себе не в состоянии. Как показывает анализ, для создания полноценной САПР КМ достаточно ограниченной версии CAE-системы, которую предоставляет, например, пакет MatLab – библиотека PDETool [4, 62]. Но для этого необходимо приобрести сам пакет MatLab, что также дорого.

17

Выход может быть найден в использовании свободно распространяемых пакетов моделирования физических полей с открытой лицензией, которые предоставляют функционал, достаточный для создания полноценной САПР КМ, в частности: FEMM, FreeFEM, FreeFEM3D, EMAP, GetDP, Femtruss, OpenFEM, GetFEM и др. Например, бесплатный математический процессор SciLab имеет возможность подключения нескольких бесплатных САЕ-пакетов [108], не уступающих по возможностям MatLab PDETool. Кроме то-го, имеется целый набор бесплатных библиотек на языке C++, которые могут быть подключены к разрабатываемым приложениям, обеспечивая их функционалом методов инженерного анализа, например, ONELAB, Deal.II, FETK, Dolfin/FEniCS, GetFEM++, LibMesh, Rheolef, MODULEF, Melina, ALBERTA-FEM и др. [50]. Отдельно отметим динамически подключаемую библиотеку моделирования физических полей EMLib, разработанную в ИГЭУ [83, 87, 106]. Данная библиотека легко интегрируется в любое вновь разрабатываемое приложение и в математические пакеты.

В настоящее время существует множество пакетов, позволяющих осуществлять имитацию эксперимента в динамике с использованием численных моделей. Одним из наиболее популярных пакетов является приложение Mat-Lab Simulink [19, 20, 103]. В открытых пакетах также имеются аналогичные приложения. Например, пакет SciLab обеспечивает пользователя приложением SciLab Xcos, являщимся аналогом MatLab Simulink.

Однако возможности всех имитационных пакетов ограничиваются, как правило, цепными моделями, что недостаточно для исследования динамики устройств нетиповых исполнений, требующих наличия полевых динамических моделей. Некоторые CAE-системы, например ANSYS Maxwell RMxptr [37], предоставляют проектировщикам функционал моделирования нестационарных магнитных полей электрических машин с учетом внешних электрических и механических цепей. Главным недостатком подобных моделей является значительное время расчета переходных процессов, которое может оцениваться часами, что крайне неудобно для использовании в САПР, при проведении многократных расчетов.

Поэтому технология моделирования динамических режимов электрических машин, представленная в [94] позволяет сократить временные показатели расчета с обеспечением необходимой точности. Данная технология позволяет совмещать в себе простоту и быстродействие цепных динамических моделей с точностью и универсальностью полевых моделей.

1.3. Численные модели для решения задач анализа и синтеза электрических машин

1.3.1. Моделирование магнитного поля в электрических машинах

Модель двухмерного квазистационарного магнитного поля строится на уравнении Пуассона, которое в декартовой системе координат имеет вид [97]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial A}{\partial y} \right) = - \left(\frac{\partial M_y}{\partial x} - \frac{\partial M_x}{\partial y} + J \right), \tag{1.1}$$

где $v = \mu^{-1}$ – удельное магнитное сопротивление среды; μ – абсолютная магнитная проницаемость; А – проекция векторного магнитного потенциала на ось z, перпендикулярную плоскости расчетной области; M_x , M_y – координаты вектора намагниченности постоянного магнита; J – проекция вектора плотности тока на ось z.

Решение данного уравнения в вариационной постановке задачи сводится к минимизации энергетического функционала, имеющего вид

$$Q = \frac{1}{2} \iint_{xy} \left(v \left(\left(\frac{\partial A}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial x} \right)^2 \right) - 2 \left(M_y \frac{\partial A}{\partial x} - M_x \frac{\partial A}{\partial y} + J_c A \right) \right) dxdy.$$
(1.2)

В методе конечных элементов (МКЭ), основные положения которого изложены в [47, 49, 63, 67, 71 и др.], расчетная область аппроксимируется треугольными элементами и интеграл по площади (1.2) заменяется суммой вкладов от каждого элемента, принимая вид

$$Q \approx \sum_{p=1}^{N_{A}} Q_{p} = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^{N_{A}} \begin{pmatrix} \frac{\nu_{p}}{4S_{p}^{2}} \{A_{p}\}^{T} [C_{p}]^{T} [C_{p}] \{A_{p}\} - \\ -2 (J_{p}A_{p} - M_{p} \{h_{p}\}^{T} \{B_{p}\}) \end{pmatrix} S_{p}, \qquad (1.3)$$

где N_{Δ} – количество треугольных элементов в расчетной области;

$$\left\{ \mathbf{B}_{p}\right\} = \frac{1}{2S_{p}} \left[C_{p} \right] \left\{ \mathbf{A}_{p} \right\}; \tag{1.4}$$

$$\begin{bmatrix} C_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{pk} & c_{pl} & c_{pm} \\ -b_{pk} & -b_{pl} & -b_{pm} \end{bmatrix};$$
(1.5)

$$S_{p} = \frac{1}{2} \sum_{q=k,l,m} a_{pq}$$
(1.6)

- площадь р-го элемента;

$$\begin{array}{c|c} a_{pq} = x_r y_s - x_s y_r \\ b_{pq} = y_r - y_s \\ c_{pq} = x_s - x_r \\ q_{r=l,m,k} \\ s=m,k,l \end{array}$$

$$(1.7)$$

k,l,m – номера узлов р-го элемента; x_q, y_q – координаты q-го узла.

Минимум функционала (1.3) находится из условия

$$\sum_{p=1}^{N_{A}} \frac{\partial Q_{p}}{\partial A_{pi}} = 0 \bigg|_{i=1..N}, \qquad (1.8)$$

где N – число узлов конечно-элементной сетки (КЭ-сетки).

Нелинейная система уравнений (1.8) приводится к виду

$$[G]{A} = {I}$$

$$(1.9)$$

и решается итерационным методом Ньютона. При этом на каждом шаге пересчитываются коэффициенты матрицы [G], зависящие от {A}, и решается система из N линейных алгебраических уравнений. Так как в двухмерных задачах величина N составляет от тысячи до сотен тысяч, то решение полевой задачи требует значительного компьютерного времени (от долей секунды до нескольких часов). В этом состоит одна из главных проблем полевых расчетов, ограничивающих их применение, например, при моделировании динамических режимов работы электрической машины.

Наиболее явно данная проблема сказывается при решении полевых задач в трехмерной постановке, где количество узлов конечно-элементной сетки возрастает примерно в \sqrt{N} раз. При этом векторный магнитный потенциал в каждом узле описывается тремя проекциями. В результате при той же плотности конечно-элементной сетки количество уравнений в 3D-задаче возрастает приблизительно в $3\sqrt{N}$ раз по сравнению с аналогичной 2D-задачей. Например, если КЭ-сетка 2D-задачи содержит N = 10000 узлов и расчет линейной системы уравнений осуществляется примерно за 1 с, то для расчета аналогичной линейной 3D-задачи потребуется порядка 100 с. Нелинейная 3D-задача будет рассчитываться около 10 – 30 мин. С ростом количества узлов КЭ-сетки сказывается «проклятие размерности», и требуемое расчетное время времени возрастает квадратично. Это недопустимо при необходимости осуществить серию полевых расчетов.

В то же время, как показано в [52, 54, 92] на примере моделирования силового трансформатора, задачу расчета магнитного поля в электромеханических устройствах рационально свести к двухмерной постановке. При этом потери точности не возникает, так как при наличии замкнутых ферромагнитных цепей точность расчета полей рассеяния оказывается соизмеримой с точностью самого МКЭ. Поэтому трехмерную полевую задачу целесообразно свести к серии двухмерных задач или воспользоваться комбинацией полевого расчета на 2D-модели с инженерными формулами для расчета величин, определяемых потоками рассеяния.

Поэтому, следует отметить, что при создании САПР КМ, ориентированных на малый и средний бизнес не стоит задача использования профессиональных 3D-CAE-систем, т.к. расчеты с обеспечением требуемой точности и быстродействия могут быть выполнены в необходимом объеме в 2Dсистемах моделирования физических полей. Второй проблемой, характерной для МКЭ, является проблема подготовки исходных данных, которая включает в себя:

1) формирование геометрической модели (эскиза) расчетной области;

- 2) задание граничных условий;
- 3) задание характеристик подобластей;
- 4) триангуляцию расчетной области.

Обычно формирование КЭ-модели устройства осуществляется в интерактивном режиме, на что тратится от одного до нескольких часов рабочего времени квалифицированного проектировщика. Поэтому серьезные САЕсистемы, как правило, предоставляют проектировщику средства автоматизации построения типовых моделей. Например, в состав пакета ANSYS Maxwell входит программный продукт RMxprt, предназначенный для ускорения процесса проектирования электрических машин [37], позволяющий генерировать КЭ-модели машин типовой конструкции.

САЕ-системы, приобретение которых доступно предприятиям малого или среднего бизнеса, такого функционала, как правило, не предлагают. Одним из выходов в этом случае является использование пакетов, которые реализованы в форме библиотек, поставляющих в базовую систему программные средства для построения модели и работы с ней. Это позволяет разработчикам САПР самим создавать приложения, позволяющие в пакетном режиме автоматически генерировать КЭ-модели и осуществлять серии расчетов на данных моделях по заданной программе.

В качестве примера рассмотрим библиотеку PDETool [4, 62], которая является приложением пакета MatLab, поставляя в него как средства для интерактивной работы с двухмерными КЭ-моделями, так и средства программирования этих моделей. Так, в [42] описан вариант параметрического генератора конечно-элементной модели магнитного поля (ПГ КЭМ МП) КМ, реализованный средствами MatLab PDETool. Данный ПГ КЭМ представляет собой программу на m-языке, позволяющую построить КЭ-модель КМ автоматически по заданным исходным данным, однозначно характеризующим геометрию расчетной области. Отметим ряд недостатков, по причине которых использование MatLab PDETool в САПР КМ неэффективно:

- 1) приложение PDETool работает только в среде пакета MatLab, стоимость которого соизмерима со стоимостью мощных CAE-систем;
- 2) формирование КЭ-модели с помощью ПГ КЭМ МП с использованием средств PDETool в случае расчетной области со сложной конфигурацией границ раздела сред (например, в случае КМ) осуществляется за 2 – 4 мин, что недопустимо для использования в САПР КМ.
- при решении нелинейной задачи расчета магнитного поля КМ были выявлены проблемы со сходимостью расчетного процесса.

Аналогичные возможности доступны проектировщику и при использовании в качестве математической основы САПР КМ, например, открытого пакета SciLab, который имеет возможность подключения доступных любому пользователю открытых САЕ-пакетов, таких как Femtruss, FreeFem, OpenFem, GetFem [108].

Использование динамически подключаемой библиотеки EMLib [83, 87, 106] является закономерным продолжением работы (94), при этом данный выбор определен следующими преимуществами:

- возможности библиотеки EMLib в плане моделирования в нелинейной постановке двухмерных квазистационарных полей не уступают возможностям аналогичных САЕ-пакетов;
- библиотека успешно опробована на множестве задач, решаемых в рамках САПР различных электромеханических устройств;
- имеется возможность интеграции библиотеки в любое открытое приложение, математический процессор или систему программирования;
- имеется возможность создания программ автоматизации генерации КЭ-модели и численного эксперимента;
- 5) имеется возможность имитации эффекта вращения ротора, а также наличие функции перестройки схемы ОЯ в процессе коммутации;

- 6) имеется возможность решения задач, выходящих за пределы изначально заложенного функционала, за счет программирования дополнительных функций, опирающихся на базовые функции библиотеки;
- 7) наличие большого опыта работы с данной библиотекой;
- имеется возможность оперативной коррекции программного кода библиотеки при возникновении необходимости решения принципиально новых задач.

1.3.2. Методы и средства для решения задачи поиска оптимального решения при проектировании электрических машин

Для решения задач оптимизации технических устройств обычно используются средства, присутствующие в любом математическом процессоре. В частности, пакет MatLab содержит две библиотеки:

- 1) Optimizftion toolbox библиотека оптимизации с использованием математического аппарата нелинейного программирования;
- Global Optimization Toolbox библиотека методов направленного случайного поиска.

Библиотека оптимизации MatLab [110] позволяет находить локальный экстремум непрерывно дифференцируемой целевой функции нескольких переменных из заданной стартовой точки с использованием квазиньютоновского алгоритма с корректировкой гессиана по формуле BSGD (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno). В случае негладких или зашумленных целевых функций целесообразно использовать алгоритм Нелдера-Мида (симплексметод). Задача оптимизации решается с учетом параметрических и функциональных ограничений. Для решения задачи многокритериальной оптимизации используется метод штрафных функций или минимаксный подход.

Библиотека Global Optimization Toolbox позволяет находить экстремум целевой функции даже при наличии дискретности или разрывов в целевой функции и предоставляет три алгоритма поиска глобального экстремума: 1. Алгоритм прямого поиска (Direct search) рассчитывает точки вокруг текущего положения, определяя таким образом направление, в котором происходит уменьшение целевой функции. Шаги поиска повторяются, пока не будет достигнут минимум.

2. Генетический алгоритм (Genetic Algorithm) многократно реализует процедуру модификации набора решений путем «скрещивания» «родительских особей», формируя таким образом особи следующего поколения, отбирая лучшие из них. Мутации позволяют избежать локальных экстремумов.

3. Алгоритм отжига (Simulated Annealing) основан на имитации процесса нагрева тела с последующим снижением температуры.

Пакет SciLab также содержит библиотеку оптимизации (Optimization and Simulation), реализующую методы нелинейного программирования, библиотеку генетических алгоритмов (Genetic Algorithms) и библиотеку имитации отжига (Simulated Annealing). Аналогичные средства поиска оптимального решения можно найти и в других математических пакетах.

Используемый в качестве основы для реализации интерфейса разрабатываемой САПР КМ табличный процессор MSExcel также имеет встроенный аппарат поиска решения. Однако функционал данного аппарата достаточно слабый и позволяет осуществлять поиск оптимизацию только с использованием квазиградиентного метода.

Для решения оптимизационных задач, характерных для электромеханики (многоэкстремальный, овражный и дискретный характер целевой функции), необходимо применение эвристических оптимизационных методов, включающих практический метод, не являющихся гарантированно точными или оптимальными, но достаточными для решения поставленной задачи. Как отмечено в [85] наилучший эффект в этом случае дают генетические алгоритмы. В частности, генетический алгоритм, реализованный в пакете MatLab, хорошо зарекомендовал себя, например, в САПР силовых трансформаторов [72]. Однако анализ, проведенный в [85] показывает, что наилучшие результаты при оптимизации электромеханических устройств могут быть получены

25

при использовании комбинации параллельного генетического алгоритма, основанного на островной модели с несколькими параллельно развивающимися популяциями, с алгоритмом Нелдера-Мида, более точно доводящего найденное лучшее решение до оптимума [23, 25, 85]. Данный алгоритм был реализован в открытом коде MatLab. Кроме того существует версия алгоритма на языке VBA. Таким образом, данный алгоритм может быть внедрен в любое приложение, функционирующее в средах MatLab, SciLab, Excel. Кроме того, его легко перевести на любой другой язык. Поэтому было принято решение использовать данную программу в качестве автономного модуля, являющегося ядром подсистемы оптимизации САПР КМ.

1.3.3. Моделирование режимов работы КМ

Если в качестве основы для реализации расчетной подсистемы САПР используется математический процессор MatLab, то для имитации моделирования рабочих режимов КМ используем приложение MatLab Simulink с расширением, реализованным библиотекой SimPowerSystems [103], в арсенале которой имеется блок DCM, реализующий нелинейную модель КМ (рис. 1.4).





Если же расчетная подсистема САПР базируется на математическом аппарате SciLab, то исследования динамических моделей КМ используем приложение SciLab Xcos. Однако аналогичного блока, в котором реализована модель КМ приложение Xcos не предоставляет (рис. 1.4) и модель КМ приходится реализовывать самостоятельно [3]. В то же время пользоваться готовыми блоками не всегда рационально, так как это сковывает свободу моделирования. Учитывая принцип множественности моделей, отметим, что ни одна из разработанных ранее моделей не является универсальной и применимой для решения любого класса задача, следовательно, разработка собственных моделей, адаптированных к специфике решаемых задач, является обоснованной, тем более что по мере накопления опыта проектирования данная модель дорабатывается без больших увеличений трудоемкости.

Установившийся режим работы электрической машины является частным случаем динамических режимов работы. Поэтому имитации режимов работы КМ используется математическая модель на основе системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ).

Обычно для описания динамических режимов КМ с последовательным возбуждением используется система ОДУ [27, 34, 55]

$$\begin{bmatrix} L_{a}(\Phi) & C_{a}(\Phi) & 0\\ 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{cases} \frac{di_{a}(t)}{dt} \\ \frac{d\alpha(t)}{dt} \\ \frac{d\omega(t)}{dt} \\ \frac{d\omega(t)}{dt} \end{cases} = \begin{cases} u(t) - R_{a} \cdot i_{a}(t) \\ \omega(t) \\ \frac{C_{a}(\Phi) \cdot i_{a}(t) - M_{0} - M_{H}}{J} \end{cases},$$
(1.10)

где u(t), $i_a(t)$ – мгновенные значения напряжения и тока двигателя; $\alpha(t)$ – угол поворота якоря; $\omega(t)$ – частота вращения; $L_a(\Phi)$, R_a – индуктивность и сопротивление в цепи ОЯ (включая все последовательно соединенные обмотки, а также сопротивление щеточного контакта; при этом индуктивность цепи ОЯ зависит от величины магнитного полтока Φ); $C_a(\Phi)$ – коэффициент, определяющий ЭДС вращения в ОЯ; J – момент инерции на валу машины; M_0 – момент холостого хода; $M_{\rm H}$ – нагрузки.

Динамические режимов КМ с параллельным и независимым возбуждением описываются системой ОДУ

$$\begin{bmatrix} L_{f}(\Phi) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{a}(\Phi) & C_{a}(\Phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{f}}{dt} \\ \frac{di_{a}}{dt} \\ \frac{d\alpha}{dt} \\ \frac{d\omega}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{f}(t) - R_{f}i_{f}(t) \\ u_{a}(t) - R_{a}i_{a}(t) \\ \omega \\ \frac{C_{a}(\Phi) \cdot i_{a}(t) - M_{0} - M_{H}}{J} \end{bmatrix}, \quad (1.11)$$

где индексы f, a относятся к цепям OB и OЯ соответственно.

В (1.10) и (1.11) учитывается, что ЭДС вращения

$$\mathbf{e}(\mathbf{t}) = \mathbf{C}(\Phi) \cdot \boldsymbol{\omega}(\mathbf{t}), \qquad (1.12)$$

электромагнитный момент машины

$$\mathbf{M}(\mathbf{t}) = \mathbf{C}(\Phi) \cdot \mathbf{i}_{a}(\mathbf{t}). \tag{1.13}$$

В случае упрощенной модели КМ

$$C(\Phi) = C \cdot \Phi(i_a) = \frac{p \cdot N_a}{2\pi \cdot a} \cdot \Phi(i_a), \qquad (1.14)$$

где p – число пар полюсов машины; а – число параллельных ветвей ОЯ; N_a – количество активных проводников в пазах якоря; зависимость $\Phi(i_a)$ задается в виде кривой намагничивания машины, обычно без учета гистерезиса.

Вариант структурной модели в среде Simulink, предназначенной для численного решения системы (1.11), представлен на рис. 1.5 [84].

Данная схема учитывает нелинейность кривой намагничивания машины, однако в ней не учитываются особенности ее конструкции, а также не учтено влияние на режимы работы реакции якоря. Кроме того, эта модель реализована средствами структурного моделирования, что не всегда удобно при имитации работы машины в составе электропривода. Аналогичная модель в SciLab XCos приведена на рис. 1.6. Графики изменения во времени токов возбуждения If, якоря Ia и частоты вращения n, полученные с помощью Simulink и XCos приведены на рис. 1.7.



Рис. 1.5. Структурная модель КМ с параллельным возбуждением в среде Simulink



Рис. 1.6. Структурная модель КМ с параллельным возбуждением в среде Хсоз



Рис. 1.7. Результаты моделирования пуска КМ, полученные в среде Simulink и Xcos



Рис. 1.8. Схема замещения КМ в Simulink SimPowerSystems

Вариант модели, более ориентированный на специфику проектных задач, приведен в [88] (рис. 1.8). Здесь использованы средства библиотеки Sim-PowerSystems в комбинации с базовыми блоками Simulink. Механическая и

30

магнитная цепи представлены электрическими схемами замещения. При этом магнитная цепь представлена отдельными участками (зубцы и спинка якоря, полюса, станина, зазор), параметры которых рассчитываются с помощью кривых намагничивания (соответственно $v_z(B_z)$, $v_a(B_a)$, $v_m(B_m)$, $v_c(B_c)$, где v_k и B_k – удельное магнитное сопротивление и магнитная индукция k-го участка магнитопровода).

При этом

$$B_{z} = \frac{\Phi p}{l_{\delta} b_{z} Z} = \Phi c_{z}, \qquad B_{a} = \frac{\Phi}{2k_{3a} l_{a} h_{a}} = \Phi c_{a}, \qquad (1.15)$$
$$B_{m} = \frac{\Phi}{k_{3n} b_{m} l_{m}} = \Phi c_{m}, \qquad B_{c} = \frac{\Phi}{2l_{c} h_{c}} = \Phi c_{c}.$$

Магнитные сопротивления участков цепи рассчитываются по формулам:

$$R_{z} = 2 \frac{h_{z}p}{\mu_{0}\mu_{z}b_{z}l_{\delta}Z} = C_{z}v_{z}, \qquad R_{a} = \frac{\pi(D_{a} - 2h_{z} - h_{a}) + 2ph_{a}}{2p\mu_{0}\mu_{a}k_{3a}l_{a}h_{a}} = C_{a}v_{a}, (1.16)$$
$$R_{m} = 2 \frac{h_{m}\sigma}{\mu_{0}\mu_{m}k_{3n}b_{m}l_{m}} = C_{m}v_{m}, \qquad R_{c} = \frac{\sigma[\pi(D_{c} - h_{c}) + 2ph_{c}]}{2p\mu_{0}\mu_{c}l_{c}h_{c}} = C_{c}v_{c}.$$

Магнитное сопротивление зазора

$$R_{d} = 2 \frac{k_{\delta} \delta}{\mu_{0} b_{\delta} l_{\delta}}.$$
(1.17)

Здесь Φ – магнитный поток; р – число пар полюсов; l_{δ} – расчетная длина машины; l_a – реальная длина якоря; l_m – длина полюса; h_z – высота зубца; b_z – средняя толщина зубца; Z – количество зубцов на якоре; h_a – высота спинки якоря; k_{3a} – коэффициент заполнения сталью якоря; h_m – высота полюса; b_m – ширина полюса; k_{3n} – коэффициент заполнения сталью полюса; σ – коэффициент рассеяния полюсов; D_c – внешний диаметр станины; h_c – высота станины; l_m – длина станины в осевом направлении; $k\delta$ – коэффициент воздушного зазора; δ – реальный зазор; $b_{\delta} = b_n + 2\delta$ – расчетная полюсная дуга; b_n – реальная полюсная дуга; μ_0 – магнитная константа; μ_k – относительная магнитная проницаемость k-го участка магнитной цепи.

Подобные цепные модели могут быть использованы в случае машин традиционной конструкции. С помощью дополнительных эмпирических и полуэмпирических коэффициентов учитывается влияние особенностей элементов конструкции, таких как насыщение кромок зубцов, пазовое и лобовое рассеяние магнитного потока, скос пазов и т.п. Аналогичная модель при необходимости строится только из базовых структурных блоков Simulink.

Если же конструкция машины содержит элементы, не учтенные ни в одной методике, необходимо переходить к полевым динамическим моделям. Относительно доступные средства моделирования магнитных полей с данной задачей не справляются. Пакет ANSYS Maxwell позволяет решить данную задачу. Однако время решения задачи расчета переходного процесса даже в двухмерной постановке оценивается часами, что недопустимо в реальном проектировании. Процесс формирования модели и расчета переходного процесса в ANSYS Maxwell существенно упрощается и ускоряется в приложении RMxprt, которое использует классическую аналитическую теорию электрических машин и метод эквивалентной магнитной цепи. Однако, как отмечается в [37], это допустимо только в случае машины стандартного типа, для которой известны расчетные методики.

Быстродействующую динамическую модель, в которой учтены особенности конструкции магнитной системы машины, можно создать на основе серии предварительных расчетов магнитного поля с последующей аппроксимацией зависимостей потокосцеплений обмоток от токов в обмотках и угла поворота ротора [39, 45]. Данный подход дополненный возможностями динамически подключаемой библиотеки моделирования магнитных полей ЕМ-Lib был развит в работах [10, 94]. В частности, в [94] приведен обобщенный математический аппарат полевой динамической модели (ПДМ) электрических машин, основанный на разложении

$$\frac{d\Psi_k}{dt} = \sum_{j=1}^n \frac{\partial\Psi_k}{\partial i_j} \frac{di_j}{dt} + \frac{\partial\Psi_k}{\partial\alpha} \frac{d\alpha}{dt} = \sum_{j=1}^n L_{kj} \frac{di_j}{dt} + C_k \frac{d\alpha}{dt}, \qquad (1.18)$$

где Ψ_k – потокосцепление k-й обмотки с магнитным полем машины; i_j – ток jго контура расчетной электрической схемы; α – угол поворота ротора; L_{kj} – взаимная индуктивность k-й обмотки с током j-го контура; C_k – коэффициент ЭДС вращения, наводимой в k-м контуре.

Это позволяет исходную систему уравнений динамики машины

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \{\Psi\} = \{u\} - [R]\{i\}, \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M - M_0 - M_{_{\rm H}}) \end{cases}$$
(1.19)

привести к виду

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \{i\} = \left[\frac{\partial \Psi}{\partial i}\right]^{-1} \left(\{u\} - [R]\{i\}\right) + \left\{\frac{\partial \Psi}{\partial \alpha}\right\} \omega, \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \left(M - M_0 - M_{_{\rm H}}\right) \end{cases}$$
(1.20)

где $\{\Psi\}$ – вектор потокосцеплений обмоток; $\{u\}$ – вектор напряжений; [R] – матрица сопротивлений; $\{i\}$ – вектор токов.

Матрицы $\left[\frac{\partial \Psi}{\partial i}\right]$ и $\left\{\frac{\partial \Psi}{\partial \alpha}\right\}$ формируются из частных производных исходных матриц $\Psi_k = \Psi_k(\{i\}, \alpha)$ обмоток, сформированных по серии предварительных расчетов магнитного поля в заданном диапазоне варьирования значений токов в обмотках $\{i\}$ при разных углах поворота ротора α и аппроксимированных многомерными сплайнами.

К числу достоинств данного подхода к моделированию динамики электрических машин относится высокое быстродействие модели, соизмеримое с быстродействием цепных моделей при точности и возможности учета особенностей конструкции машины, характерных для полевых моделей.

Дальнейшее развитие данного подхода к моделированию динамических режимов работы КМ путем использования ПДМ КМ в современных имитационных пакетах позволит применить современные точные динамические модели КМ при проектировании и исследовании электроприводов.

Выводы по первой главе и постановка задач

1. Как правило, все электромашинстроительные предприятия разрабатывают собственные, зачастую далекие от современных достижений науки, САПР, в которых находит воплощение собственный накопленный опыт проектирования и производства машин. При этом в условиях конкуренции вновь создаваемые предприятия, особенно в сфере малого и среднего бизнеса, оказываются в проигрыше.

2. Наличие в КМ неподвижного относительно статора магнитного поля дает возможность модификации статора путем использования нетиповых элементов конструкции (например, усечение спинки статора, введение прорезей и т.п.). При этом возникает необходимость разработки новой методики проектирования, применимой для случаев нетиповой конструкции КМ, для которой отсутствует апробированная инженерная методика. Поэтому новую методику проектирования, целесообразно разработать на основе полевых моделей, в первую очередь, модели магнитного поля. Это позволит избежать недостатков цепных моделей в случаях введения нетиповых элементов конструкции КМ.

3. Все современные САПР ориентированы на поиск оптимального решения. Так как конструкция КМ может включать в себя нетиповые элементы и заранее не определена, САПР КМ должна включать в себя элементы структурно-параметрической оптимизации, что возможно только при использовании при расчете функции цели результатов полевых расчетов.

4. При проектировании машин с нетиповым исполнением возникает проблема анализа ее работы в различных режимах, в том числе в переходных и близких к аварийным. Отсутствие результатов эксперимента в этом случае компенсируется исследованиями динамических моделей данных машин, построенных на результатах расчета магнитного поля, что позволяет учесть влияние на динамику машины особенностей ее конструкции. Однако время расчета такой полевой динамической модели должно быть соизмеримо с временем расчета традиционных цепных моделей.

5. Для построения быстродействующей полевой динамической модели КМ могут быть использованы результаты предварительной серии полевых расчетов, аппроксимированных многомерными сплайнами или многомерной кусочно-линейной функцией. Построение такой модели требует наличия относительно затратного по времени этапа обучения, после которого имитация режимов работы машины произвольной конструкции осуществляется практически в реальном времени без потери точности и универсальности, характерных для полевых моделей.

6. На основании сравнительного анализа спектра современных САЕсистем для решения обозначенных выше задач рационально использовать автономную библиотеку конечно-элементного моделирования магнитного поля EMLib, способную интегрироваться с математическими пакетами и разрабатываемыми приложениями, поставляя в них функционал для программирования процессов автоматической генерации полевой модели и ее численного исследования по заданному алгоритму или в режиме имитации.

7. В качестве основы для функционирования расчетной подсистемы САПР КМ рационально использовать табличный процессор MSExcel, обеспечивающий разработчика удобным табличным интерфейсом и достаточным функционалом, который легко расширяется с помощью макросов VBA. Кроме того, MSExcel легко стыкуется со всеми признанными CAD- и CAEсистемами, а также с математическими пакетами, в частности с MatLab и SciLab, что избавляет разработчика от необходимости выполнения рутинных работ по проектированию и реализации интерфейсных конструкций САПР.

8. Для разработки наукоемкого математического аппарата расчетной подсистемы САПР КМ рационально использовать математический пакет MatLab, связанный с пакетом MSExcel посредством интерфейса ExLink. При отсутствии у пользователя САПР коммерческой лицензии на данный пакет можно воспользоваться аналогичным пакетом с открытой лицензий SciLab,

35

обладающим достаточным для развертывания САПР КМ функционалом. Использование математических пакетов избавляет разработчика САПР от необходимости выполнения рутинных работ по программированию наукоемких математических методов.

На основе данных выводов сформулируем следующие задачи:

1. Разработать относительно дешевую по цене инструментальную среду, доступной малому и среднему бизнесу, позволяющую в то же время решать задачи, которые оказываются под силу только тяжеловесным САПР.

2. Разработать параметрический генератор, позволяющий автоматизировать построение полевых моделей КМ нетиповой конструкции, а также разработать методику анализа и синтеза проектных решений КМ, основанную на использовании автоматически генерируемых полевых моделей.

3. Разработать оптимизационную модель, способную по ограниченному набору исходных параметров автоматически генерировать по заданному алгоритму и рассчитывать серии полевых моделей с изначально непредсказуемой конфигурацией расчетной области для решения задачи структурнопараметрической оптимизации.

4. Разработать быстродействующую полевую динамическую модель КМ, способную интегрироваться в современные имитационные пакеты в качестве компонента систем автоматизированного электропривода, а также разработать подсистему моделирования произвольных режимов работы КМ нетиповой конструкции на основе существующих имитационных пакетов.

5. Апробировать разработанную инструментальную среду и разработанную методику анализа и синтеза проектных решений путем реализации структурно-параметрического поиска оптимального варианта одной из существующих коллекторных машин.
2. Разработка оптимизационной модели для решения задачи синтеза коллекторной машины

2.1. Теоретическое обоснование структуры оптимизационной модели коллекторной машины

Под оптимизационной моделью в современной научной литературе понимается математическая модель, используемая для решения оптимизационной задачи. В свою очередь под оптимизационной задачей в проектировании понимается задача определения наилучшей структуры или наилучших параметров проектируемых объектов [1, 2, 9] (с формальной точки зрения наилучшим решением считается решение, характеризующееся минимальным численным значением некоторой функции цели). В первом случае речь идет о структурной оптимизации, во втором – о параметрической оптимизации.

Оптимизацию модели коллекторной машины целесообразно проводить с применением декомпозиции областей построения с использованием конечноэлементной модели. При этом необходимо провести адаптацию научных положений разрабатываемой методики к решению инженерных задач с проведением модельные и натурных экспериментов.

В плане проектирования электрических машин под структурой понимается конструкция машины. В то же время конструкция формализуется в виде множества конструктивных элементов, каждый из которых характеризуется своим набором варьируемых параметров. Набор таких элементов в проектируемом устройстве варьируется в широком диапазоне. При этом оптимизационная задача переходит в разряд задач структурно-параметрического синтеза, под которым понимается поиск структуры проектируемого объекта и значений параметров, характеризующих структурные элементы объекта, удовлетворяющих техническому заданию и критериям оптимальности [15].

К особенностям моделей, предназначенных для решения задачи структурно-параметрического синтеза относятся [15]:

- 1) отсутствие изначально заданной и неизменной структуры объекта, которая может синтезироваться автоматически;
- организация поиска на множестве структурных элементов и в пространстве их параметров;
- отсутствие заданной размерности и неизменного элементного состава вектора варьируемых параметров, которые сами варьируются в зависимости от текущего набора структурных элементов.

В случае электрических машин при расчете целевой функции целесообразно использовать конечно-элементную модель магнитного поля [30, 31, 94]. При этом различные исполнения электрической машины (объекты с различной структурой) оказываются лишь вариантами одной полевой модели, отличающимися конфигурациями расчетной области. Это позволяет свести задачу структурно-параметрического синтеза к традиционной задаче параметрической оптимизации. Это направление имеет множество подходов к реализации. В данной диссертации (с учетом работы [94]) выполнена разработка параметрического генератора конечно-элементной модели, позволяющего строить полевые модели электрических машин с различным набором конструктивных элементов, определяемым значениями входных параметров. Разработка методики синтеза такого генератора для случая коллекторных машин является одной из задач данной диссертации.

Так как в процессе оптимизации осуществляется расчеты тысяч вариантов проектируемой машины, то основным требованием к целевой функции является требование быстродействия. В то же время полевые задачи относятся к числу задач, наиболее требовательных к компьютерным ресурсам. Поэтому на современном этапе развития компьютерных технологий весьма затруднительно при расчете функции цели использовать трехмерные полевые модели. Однако двухмерные модели, расчет которых требует от долей секунды до нескольких секунд машинного времени, сегодня могут быть успешно использованы в оптимизационных задачах. Таким образом, ядром разрабатываемой оптимизационной модели коллекторной машины является подсистема, осуществляющая генерацию двухмерной модели магнитного поля по заданному набору входных (в том числе варьируемых) параметров, определяющих конструктивное исполнение машины, а также подсистема, осуществляющая расчет данной модели с передачей результатов в подсистему расчета целевой функции (рис. 2.1).





Исходные данные для оптимизационной модели должна поставлять проектная модель, в которой реализована традиционная инженерная методика проектирования машины, являющейся аналогом проектируемого устройства. Спроектированная здесь машина выступает в качестве стартовой точки оптимизационного процесса. В качестве аналога может выступать также любое ранее спроектированное или уже существующее устройство. Характеризующие его величины условно делятся на две группы (некоторые величины могут переноситься из одной группы в другую):

- статические параметры, значения которых в процессе оптимизации не изменяются, например, выбранная форма пазов, разрешение на использование тех или иных элементов, параметры якоря, и т.п.
- варьируемые параметры, значения которых могут изменяться в процессе поиска оптимального решения.

На элементы вектора варьируемых параметров \vec{X} могут быть наложены параметрические ограничения вида

$$X_{i\min} \le X_i \le X_{i\max}. \tag{2.1}$$

В модуле расчета целевой функции на основе расчета магнитного поля должны рассчитываться некоторые характерные параметры КМ, характеризующие номинальный режим работы машины, образующие вектор выходных величин $\vec{Y}(\vec{X})$. К таким величинам относятся величина магнитного потока, электромагнитный момент, частота вращения, коэффициент полезного действия и т.п.. Кроме того, здесь должны рассчитываться все массогабаритные показатели машины, расход материалов, приблизительная себестоимость изделия. Необходимо также оценить механическую прочность и перегревы узлов машины.

В качестве функции цели $f(\vec{X})$, проектировщиком задается любое алгебраическое выражение, построенное из элементов вектора $\vec{Y}(\vec{X})$, дающее числовое значение при любых значения $\vec{Y}(\vec{X})$, минимальное значение которого формально соответствует оптимальному варианту устройства.

На некоторые из элементов вектора $\vec{Y}(\vec{X})$ могут быть наложены функциональные (критериальные) ограничения вида

$$Y_{j\min} \le Y_j \le Y_{j\max} \,. \tag{2.2}$$

Данные ограничения учитываются в виде штрафов функции цели. В результате итоговая функция цели принимает вид

$$F(\vec{X}) = f(\vec{X}) + \sum_{j=1}^{Ny} \begin{cases} k_{jmax} \left(Y_{j} - Y_{jmax}\right) \forall Y_{j} > Y_{jmax} \\ k_{jmin} \left(Y_{jmin} - Y_{j}\right) \forall Y_{j} < Y_{jmin} \\ 0 \forall Y_{jmin} < Y_{j} < Y_{jmax} \end{cases}$$
(2.3)

где k_{jmin} и k_{jmax} – вестовые коэффициенты, значения которых подбирается из опыта проектирования.

В качестве основы для реализации оптимизационной модели КМ предлагается использовать табличный процессор MSExcel. При этом модули всех подсистем модели (см. рис. 2.1) могут быть реализованы в форме макросов в системе VBA. Модуль параметрической генерации КЭ-модели и модуль расчета магнитного поля КМ должны обращаться к функциям библиотеки ЕМ- Lib, предоставляющих программисту набор объектов модели, а также функции их создания, деформации, связи и т.п. Для поиска оптимального решения было решено выбрать генетический алгоритм [23, 25, 85], о чем говорилось в п. 1.3.2.

2.2. Разработка генератора полевых моделей коллекторных электрических машин

2.2.1. Декомпозиция и алгоритм построения расчетной области КМ

К базовым графическим объектам, из которых состоит КЭ-модель библиотеки EMLib, относятся [74, 87]:

1) опорные точки, образующие множество

$$\mathbf{T} = \{ \mathbf{T}_{i} \mid \mathbf{T}_{i} = (\mathbf{x}_{i}, \mathbf{y}_{i}, \mathbf{r}_{i}) \},$$
(2.4)

где x_i, y_i – координаты; r_i – радиус аппроксимации примитивов в окрестности i-й точки;

2) графические примитивы (отрезки и дуги), образующие множество $\mathbf{P} = \{ \mathbf{P}_i \mid \mathbf{P}_i = (\mathbf{T}_{i1}, \mathbf{T}_{i2}, \mathbf{T}_{i3}, \mathbf{g}_i) \}, \qquad (2.5)$

где T_{ik} – опорные точки примитива; g_i – признак границы;

3) подобласти, занятые однородной средой, образующие множество $\mathbf{R} = \{ \mathbf{R}_i \mid \mathbf{R}_i = (\mathbf{T}_i, \mathbf{M}_i, i_i, n_i, \mathbf{h}_{xi}, \mathbf{h}_{yi}, \mathbf{w}_i, \mathbf{p}_i) \}, \qquad (2.6)$

где T_i – опорная точка внутри подобласти; M_i – материал подобласти; n_i – количество проводников в подобласти; i_i – ток в проводниках; h_{xi} , h_{yi} – координаты вектора намагничивания; w_i , p_i – параметры триангуляции;

4) секции обмоток, образующие множество

$$\mathbf{S} = \{ \mathbf{S}_i \mid \mathbf{S}_i = (\mathbf{T}_{i1}, \mathbf{T}_{i2}, \mathbf{w}_i) \},$$
(2.7)

где T_{i1}, T_{i2} – опорные точки активных сторон секции; w_i – число витков;

5) параллельные ветви обмоток, образующие множество

$$\mathbf{V} = \{ \mathbf{V}_i \mid \mathbf{V}_i = \{ \mathbf{S}_{ik} \mid \mathbf{S}_{ik} \in \mathbf{S} \} \},$$
(2.8)

где S_{ik} – секции из множества S;

6) обмотки, образующие множество $\mathbf{W} = \{ \mathbf{W}_i \mid \mathbf{W}_i = \{ \mathbf{V}_{ik} \mid \mathbf{V}_{ik} \in \mathbf{V} \} \},$

где V_{ik} – параллельные ветви из множества V;

7) подвижный якорь с коллектором

$$\mathbf{A} = (\mathbf{x}_{0}, \mathbf{y}_{0}, \mathbf{R}_{z} \in \mathbf{R}, \mathbf{W}_{a} \in \mathbf{W}, \mathbf{K} = (\mathbf{d}_{k}, \mathbf{z}_{k}, \mathbf{y}_{1}, \mathbf{y}_{2}, \mathbf{\alpha}_{k}, \mathbf{\alpha}_{u}, \mathbf{b}_{u})),$$
(2.10)

где x_0 , y_0 – координаты оси вращения; R_z – подобласть зазора из множества **R**; W_a – обмотка якоря из множества **W**; K – коллектор; d_k , z_k – диаметр коллектора и число пластин; y_1 , y_2 – шаги ОЯ по коллектору; α_k – угол расположения первой платины коллектора; α_{μ} , b_{μ} – угол расположения первой щетки и ширина щетки.

Расчетная область, состоящая из множеств (2.4) – (2.10), условно разбивается на типовые фрагменты, соответствующие структурным элементам КМ (пазам, зубцам и т.п.), каждому из которых соответствует свое подмножество опорных точек, примитивов и подобластей. В результате расчетная область представляется множеством фрагментов

$$\mathbf{F} = \{ \tilde{\mathbf{F}}_i \mid \tilde{\mathbf{F}}_i = \{ \tilde{\mathbf{T}}_i \subset \mathbf{T}, \mathbf{I}_i \subset \tilde{\mathbf{T}}_i, \tilde{\mathbf{P}}_i \subset \mathbf{P}, \tilde{\mathbf{R}}_i \subset \mathbf{R} \},$$
(2.11)

где **I** – множество интерфейсных точек, посредством которых данный фрагмент связывается с другими фрагментами (на рис. 2.2 интерфейсные точки выделены).

Так как разрабатываемый пара-



(2.9)

Рис. 2.2. Стыковка фрагментов

метрический генератор будет использован при структурно-параметрической оптимизации проектируемого устройства, то он должен обеспечивать возможность построения максимального количества известных исполнений КМ, а также возможность произвольной комбинации структурных элементов с выходом на изначально не запланированные варианты конструкции. В то же время невозможно учесть в одном программном продукте все возможные варианты исполнений, так как любое стремление к универсальности усложняет систему. Поэтому в качестве ограничения примем, что разрабатываемый параметрический генератор должен быть ориентирован на реверсивные машины явнополюсной и неявнополюсной конструкции с возможным усечением спинки статора и наличием (или отсутствием) прорези на оси главного полюса для уменьшения потока реакции якоря (см. рис. 1.3). Набор типовых структурных элементов, из которых методом комбинации будет строиться расчетная область машины, должен быть строго определен, иначе задача усложняется и становится практически не решаемой.



Рис. 2.3. Декомпозиция расчетной области КМ

Анализ вариантов исполнения КМ позволяет выделить минимальный набор элементов КМ, представленный в виде схемы на рис. 2.3.

Как следует из п. 1.1, в случае КМ разнообразие вариантов касается в первую очередь конструкции статора. Наличие полюсной периодичности и требование реверсивности проектируемой машины говорит о том, что статор строится из одинаковых сегментов, ассоциированных с полюсным делением. Поэтому при построении КЭ-модели часто бывает достаточно ограничиться построением одного или нескольких полюсных делений.

Сегмент статора включает в себя массив пазов, массив зубцов и массив сегментов спинки. На оси главного полюса может быть построена прорезь с перемычкой или без нее. В данной версии ПК КЭМ предусмотрена также возможность плоского усечения спинки статора, которое выравнивает магнитное поле, придавая сечению машины форму многогранника.

Основным и самым сложным в плане разнообразия структурным элементов расчетной области КМ является паз. Форма пазов могут быть различной, но анализ показывает, что большинство пазов, используемых в электрических машинах (за исключением фигурных пазов короткозамкнутого ротора асинхронных машин) построены путем комбинации нескольких типовых элементов. Для этого паз разбивается на четыре области, каждая из которых оформлена в виде нескольких вариантов:

1) область шлица, имеющая один вариант исполнения (рис. 2.4);



Рис. 2.4. Область шлица

2) область клина, имеющая четыре варианта исполнения (рис. 2.5);



Рис. 2.5. Варианты область клина

3) область дна, имеющая четыре варианта исполнения (рис. 2.6);



Рис. 2.6. Варианты области дна паза

 область обмотки, имеющая два варианта исполнения (рис. 2.7), соответствующих однослойной и двухслойной обмоткам.



Рис. 2.7. Варианты области обмотки

Каждый элемент паза оформляется в виде фрагмента, в котором предусмотрены по четыре интерфейсные точки для связи его с другими элементами (мелкие точки на рис. 2.8). В случае пазов с изоляцией количество интерфейсных точек увеличивается. Весь паз как комбинированный фрагмент имеет свои интерфейсные точки (крупные точки на рис. 2.8) посредством которых он стыкуется с зубцами и сегментами спинки статора и зазором. Пазы якоря стро-



Рис. 2.8. Структура паза статора

ятся аналогичным образом, но перевернуто. Построенный паз поворачивается на заданный угол относительно оси вращения.

Обычно все пазы статора делают одинаковыми. Однако с теоретической точки зрения интересна возможность выполнения пазов разной высоты. Пазы распределяются по дуге сегмента статора равномерно, но некоторые пазы могут быть пропущены. Особым типом паза является межполюсное окно (при его наличии). Дополнительный полюс представляет собой частный случай зубца (при его наличии). Область зубца соответствует пространству между соседними пазами. Спинку статора рационально построить в виде комбинации сегментов спинки, соответствующей зубцовым делениям.

Отдельно строятся секции обмоток статора, которые могут выполняться как однослойными, так и двухслойными. Слои делят пазы на части по вертикали. В межполюсном окне возможны как вертикальные, так и горизонтальные слои.

Якорь состоит из аналогичных объектов, но без сегментации по полюсным делениям. Если расчетная область строится не полностью с учетом условия полюсной периодичности, то область якоря представляет собой сегмент, соответствующий строящимся полюсным делениям. Если на сегменте якоря укладывается дробное число пазов, то их размеры пересчитываются так, чтобы укладывалось цело число пазов при сохранении геометрии и размеров зубца. Форма и размеры всех пазов якоря одинаковы. Спинка якоря состоит из сегментов зубцовых делений аналогично спинке статора.

Обмотка якоря выполняется двухслойной и состоит из секций, активные стороны которых расположены в пазах. В разрабатываемой версии ПГ КЭМ МП КМ предусмотрена только простая волновая обмотка, как наиболее часто используемая в современных КМ небольшой мощности. Схему ОЯ определяет особый объект мо-



Рис. 2.9. Блок схема генерации конечно-элементной модели КМ

дели – коллектор, характеризующийся набором параметров: диаметр, количество пластин, равное количеству секций ОЯ, начальный угол первой пластины, ширина щетки. Коллектор распределяет секции ОЯ по параллельным ветвям. При вращении якоря секции повторно перераспределяются на каждом шаге в зависимости от угла поворота якоря относительно щеток. Ток ОЯ также распределяется по секциям с помощью коллектора в соответствии с допущением о линейном характере коммутации.

Область между якорем и статором представляет собой воздушный зазор. При вращении якоря зазор полностью перетриангулируется на каждом шаге.

Блок схема алгоритма генерации КЭ-модели, соответствующего представленной на рис. 2.3 декомпозиции расчетной области КМ, приведена на рис. 2.9. Формирование модели начинается с расчета параметров всех ее графических объектов (2.4) – (2.10). При этом статор рассчитывается в двух вложенных цикла: цикл по пазам и цикл по сегментам полюсных делений (в понятие расчета в данном случае входит расчет координат опорных точек, а также формирование описаний опорных точек, примитивов, подобластей и секций). Якорь рассчитывается только в цикле по пазам.

Сформированные описания графических объектов передаются в базовую систему, осуществляющую управление процессом проектирования (например, на рабочий лист MSExcel при создании единичной модели или в массивы VBA при создании серии моделей, например при оптимизации). Затем вызываются соответствующие функции библиотеки EMLib, которые по сформированным описаниям создают собственно графические объекты в памяти библиотеки, а также осуществляют триангуляцию всей расчетной области и оптимизацию триангуляции и нумерации узлов. После этого формируются секции и обмотки KM. В заключение формируется коллектор.

Управление работой параметрического генератора осуществляется путем задания значений параметров генерации. Это могут быть численные размеры или разного рода инструкции, принимающие дискретные значения, например: 1 – элемент конструкции присутствует; 0 – элемент отсутствует.

47

2.2.2. Разработка и апробация подсистемы параметрической генерации конечно-элементной модели КМ

Внешний вид подсистемы генерации конечно-элементной модели КМ представлен на рис. 2.10. В качестве интерфейсной основы выбран табличный процессор MSExcel. Исходные данные сгруппированы в несколько таблиц: таблица данных, характеризующих машину в целом; таблица параметров статора; таблица параметров ротора; обмоточные данные машины; параметры якоря и коллектора. Типы пазов статора и ротора выбираются из списка возможных вариантов диалоговых окон (рис. 2.11), впадающих при нажатии соответствующих кнопок. Наличие пазовой изоляции регламентируется дискретным параметром: 1 – да; 0 – нет. Некоторые варианты пазов после построения приведены на рис. 2.12.

6	CreateModelxism - Microsoft Excel											X						
Главная Вставка Разметка страницы Формулы Данные Рецензирование Вид Разработчик										0.	. 🕫 X							
рани и по											A							
			Общи	и) (-		Форма	тироват	ъ как	таблиц	у - 🎬 Удалить - 🏮 -	R	r un	1 4	~				
B	тавит	• 🥜 🛛 🕱 🗶 * 🛄 * 💁 * 📥 * 📑 🗮 📰 📰		- 9.	🥰 - % 000 號 👯 Стили ячеек -						Формат • 📿 •	ии и						
Буф	ep 06M	іена 😼 Шрифт 🗔 Выравнивания	2	Га Число Га Стили							Ячейки	Редак	тирование	MAT	LAB			
	AB	C	D	E	F	G	Н	L	J	K L	M	N	0	Р	-			
	<u>Г</u> е	енерация КЭ-модели электрическ	ой л	nauun	161	Опт	П											
1	От	крыть окно Закрыть окно Геометрия Расчет Д	инам	ическая м	одель	ГА	ГЗ											
2		F		- 5		~									1			
3		теометрия расчет	нои	oonact	И					-		-						
5		Электрическая	маг	иина						Nº	Название	Ед	Обозн.	Знач.				
6	№	Название	Ед	Обозн.	Старт	Итог	Мин.	Макс.	В	1	Шаг аппр. зазора	MM	Rz	1				
7	1	Число пар полюсов	-	р	2		1	20	0	2	Шаг аппр. клина	MM	Rk	1,6				
8	2	Расчетная длина машины	MM	Lwk	79		1	10000	0	3	Шаг аппр. дна	MM	Rd	3,9				
9	3	Граничные условия периодичности (0 - нет, 1 - да)	8	IsGran	1	a	0	1	0	4	Шаг аппр. границы	MM	Rg	4	·			
11																		
13		Индукти	op						0.11									
14	No	Название	Ед	Обозн.	Старт	Итог	Мин.	Макс.	В	1	Вид клиновой части	3	KOS	1				
15	1	Марка стали статора		Stal	2013		0	10000	0	2	Вид дна паза	- e.	TOS	1				
16	2	Внешний диаметр сердечника	MM	DaS	135		1	1000	0	3	Параллельные стенки	-	TOSp	0	н			
17	3	Внутренний диаметр сердечника (на оси полюса)	MM	DiS	83		83,00	88,2	1									
18	4	Радиус расточки полюса (учет элиптичности)	MM	им DiS0 91 1 1000 0							Паз статора							
19	5	Расчетное число пазов	. ÷	ZS	40		4	100	1	1		R	Dn					
20	6	Число невырубленных пазов на оси полюса	-	ZSp	0		0	9	1	1		Jugs						
21	7	Число невырубленных пазов на нейтрали	<u></u>	ZSO	4		0	9	1	1		P.	- 1		-			
22	8	Количество отображаемых полюсных делении		kPol	4		1	4	0	- 4								
23	-	Наличие дополнительного полюса (0 - нет, 1 - да)	-	ISDP	1	8	0	1	0	-	/ /							
24	9	Расстояние от оси до сечения спинки статора	MM	HS	>>		50	20	1			1						
25	10	ичинимально допустимая толщина спинки статора	MM	namin	0		1	1000	0			1						
20	12	Ширина прорези в зуоцовои зоне	MM	BVS	5		0	1000	0			1						
27	12	Ширина прорези в зоне спинки	MM	HV	1		0	1000	0	2		1	BKLS					
20	14	Напичие стальной перемычки (0 - нет 1 - да)	wind	SV	0		0	1	0	17	1X V	A	2		-			
30	15	Напичие пазовой изопящии (0 - нет 1 - та)	_	IsIzol	0		0	1	0		1	17						
31	16	Топщина пазовой изоляции (о пет, т - да)	MM	dI ₇ P	0.5	7	01	5	0			10	01					
32	17	Толщина изоляции на лне паза	MM	dIzDP	0.5	S	0.5	5	0			1 2	=					
33	18	Толшина изоляции в области клина	MM	dIzShP	1		0.5	5	0			-						
34	19	Толщина межслоевой изоляции	MM	dIzSIP	1		0,5	5	0		XA		-					
35	20	Тип паза статора	_	TPS	1		1	15	0	1 -		Rrs						
36	21	Глубина паза	MM	hzS	18		8	20	1	1		DUS	. /					
14 4	► FI	ЭМ / УКД / ДПТ / Модель / Pf / Pa / Pk / Fi / Mem /	Прил	ожение 🏑	СМ 🖉 КЭГ	И /ЛИСТ	1 / Лист	2 / Ли	ст3 📈	2					*			
Гото	BO											世 1	00% (-)-		+			

Рис. 2.10. Внешний вид подсистемы генерации КЭ-модели



Рис. 2.11. Диалоговое окно со списком вариантов пазов статора



Рис. 2.12. Варианты пазов для однослойных и двухслойных обмоток статора без учета изоляции (а) и с учетом изоляции и тока в пазу (б)

При изменении значений параметров ПГ КЭМ КМ строит следующие элементы конструкции статора:

- пазы разной формы (рис. 2.12) с изоляцией или без нее, распределенные равномерно по зубцовому слою, а также с пропуском одного или нескольких пазов в области геометрической нейтрали и в области оси полюса; пазы могут иметь одинаковую высоту или переменную высоту, определяемую параметрами спинки статора;
- межполюсное окно явнополюсной КМ с дополнительным полюсом или без него с выделенными областями обмоток возбуждения и обмотки добавочного полюса с расположением активных сторон обмоток в вертикальных или горизонтальных слоях;
- 3) спинку статора с усечением на заданную глубину или без усечения;
- 4) прорезь на оси полюса заданной ширины с перемычкой или без нее;
- 5) зазор машины может быть равномерным или неравномерным.

CreateModel_7.xlsm - Microsoft Excel													
		Главная Вставка Раз	метка страни	цы Формулы	Д	анные	Рецен	зирование	Вид Ра	зработчик	🔞 🗕 📼 🗴		
Вс Буфе	Сайыт т11 = = = = = □ Общий Вставить ✓ Ж ½ ч А [*] А [*] 三 = = □ Общий Буфер обмена ✓ Шрифт ✓ Выравнивание ✓ Число					• 000	Стили	 Вставить * Удалить * Формат * Ячейки 	Σ - А 	ровка Найти и провка Найти и пьтр т выделить ктирование	• MATLAB		
Q49 • fx =P49*30/ПИ()								*					
	В		С			D	E	F	G	Н	- I	J 4	
	Ге	нерация и иссл	педован	ние КЭ-мо	дe.	ли э	лект	рическа	эй маш	ины		-	
Открыть окно Закрыть окно Геометрия Сохранить Расчет Динамика						Нормальный	режим с триангул	яцией 🔽					
114				Обмотки	сm	amo	pa				Вылет	(MM)	
115		Низ Секции о	бмоток ст	атора Верх			Wниз	Рниз	Wверх	Рверх	Низ	Bepx	
116	1	OB	- Не занят	r			1000	1	0	5	15	0	
117	2	ко	• Не заня	r	-	g	15	4	0	5	15	0	
118	3	ко	💌 Не занят	T		Olli	15	4	0	5	20	0	
119	4	ко	• Не заня	-	-	п	9	4	0	5	30	0	
120	5	ко	• Не заня	•		ине	6	4	0	5	40	0	
121	6	Не занят	• Не заня	Ī		IOB	0	5	0	5	0	0	
122	7	Не занят	• Не заня	-	H	101	0	2	0	5	0	0	
123	8 0	Не занят	• Не заня	-	÷	На	0	5	0	5	0	0	
124	10	Не занят	• Не заня	-	÷		0	5	0	5	0	0	
126	N₂.	H	Іазвание			Ед	Обозн.	Знач.	dпр (мм)	F (A)	•	•	
127	1	Сечение провода ОВ				мм ²	Sob	0,0189	0,155126	549,00	= Fob		
128	2	Сечение провода СО				мм ²	Sco	0,564	0,847412	0,00	= Fco		
129	3	Сечение провода КО				мм ²	Sодп	0,564	0,847412	549,00	= Fcym		
130	4	Сечение провода ОДП					Sко	0,564	0,847412	Вылет (мм)			
131	31 5 Сечение провода ОЯ					мм ²	Soя	0,503	0,800275	20			
	► N	ЭМ Оптимизация Д	пт 🖉 укд 🗸	Модель / Pf / P	a /	Pk / F	i 🖉 Mem 🖌	Варианты	Приложе				
	60				_						<u> </u>	U ,	

Рис. 2.13. Распределение секций по пазам и обмоткам статора

На статоре автоматически размещаются секции обмоток. Секции соединяются в обмотки OB, CO, KO и OДМ. Обмотки могут быть однослойными концентрическими или двухслойными концентрическими. Распределение секций по пазам и обмоткам задается параметрами таблицы рис. 2.13.

На якоре автоматически формируется двухслойная равносекционная волновая ОЯ. Параметры ОЯ и коллектора задаются в таблице рис. 2.14. Здесь же приведена таблица токов в цепях ОВ и ОЯ (токи в КО, СО и ОДП равны току ОЯ). Коллектор и щетки управляют распределением тока ОЯ по параллельным ветвям и секциям ОЯ с учетом наличия коммутирующих секций с учетом допущения о линейной коммутации.

		CreateModel.xlsm - Micros	oft Excel	Sec. 2			
	Гл	авная Вставка Разметка страницы Формулы Данные І	Рецензир	ование Е	ид Разр	аботчик	🕜 _ 🗖 🗙
A	В	с	D	E	F	G	H
	Ге	нерация КЭ-модели электрическ	кой л	161	Опт	II.	
1	От	хрыть окно Закрыть окно Геометрия Расчет	Динам	ическая м	одель	ГА	ГЗ
101	1	Обмотка якоря + колле	ктор	(
102	Nº	Название	Ед	Обозн.	Знач.	Реком.	
103	1	Диаметр коллектора	MM	Dk	62	61,65	
104	2	Число витков в секции	1	Ws	11	-	
105	3	Число элементарных пазов в одном реальном		up	3	3	
106	4	Первый частичный шаг по коллектору	1.4	y1	15	15	
107	5	Второй частичный шаг по коллектору	- E	y2	16	16	
108	6	Сдвиг с оси полюса первой пластины (пластин)	пл.	dpk	-1	0	
109	7	Угол первой щетки по отношениию к оси полюса	град	ОСЩ	0	0	
110	8	Ширина щетки	MM	bщ	6	6	
112							
114		Токи в обмотках					
115	N₂	Название	Ед	Обозн.	Знач.	Реком.	
116	1	Ток в цепи ОВ	A	If	0,38		
117	2	Ток в цепи якоря	A	Ia	4,5	-	
14 4	► H.	ЭМ / УКД / ДПТ / Модель / Pf / Pa / Pk / Fi / Mem	Прил	ожение	4		>
Гото	во				100% (=) 🗸 🗸	÷ .:

Рис. 2.14. Таблица параметров ОЯ и коллектора и таблица задания токов в обмотках

При изменении параметров ПГ КЭМ КМ строит различные варианты исполнения КМ, в частности:

 Явнополюсная КМ с обмотками параллельного и последовательного возбуждения, с дополнительным полюсом и без него, с КО, распределенной в пазах, выполненных на полюсах и без КО, с усечением спинки и без усечения, с прорезью по осям полюсов и без прорези. Некоторые варианты моделей явнополюсной КМ приведены на рис. 2.15.



Рис. 2.15. Варианты исполнения явнополюсной КМ, созданные подсистемой параметрической генерации КЭ-модели

2. Неявнополюсная КМ с обмотками, с усечением спинки и без усечения, с равномерным и неравномерным распределением пазов одинаковой или неодинаковой высоты, с прорезью по осям полюсов и без прорези. Прорезь может быть выполнена с перемычкой или без нее. Некоторые варианты моделей неявнополюсной КМ приведены на рис. 2.16.



Рис. 2.16. Варианты исполнения неявнополюсной КМ, созданные подсистемой параметрической генерации КЭ-модели

Главной особенностью разработанной подсистемы ПГ КЭМ, отличающей ее от аналогов, таких как RMxprt (ANSYS Maxwell), является гибкость перехода в рамках единого программного кода на разные исполнения машины, в том числе нетиповые. Это качество является определяющим для использовании данной подсистемы в качестве ядра подсистемы формирования функции цели процесса поиска оптимального решения.

Следует отметить, что для целей оптимизации определяющее значение имеет скорость генерации и расчета КЭ-модели. Для сокращения расчетного времени без потери точности традиционно используется факт полюсной симметрии магнитного поля в электрической машине. Поэтому разработанная подсистема генерации КЭ-модели позволяет создавать как модели полного сечения машины (рис. 2.15 – 2.16), так и модели, построенные с учетом условий периодичности, представленные, например, на рис. 2.17.



Рис. 2.17. Модели неявнополюсной КМ серии 4П, выполненные с учетом условий периодичности: а – одно полюсное деление; б – два полюсных деления

Следует отметить, что разработанный ПГ КЭМ КМ не обеспечивает построение исчерпывающего многообразие моделей всех типов КМ. В особых случаях проектировщик должен сам разработать параметрический генератор КЭ-модели, опираясь на функционал, предоставляемый подсистемой ПГ КЭМ. В частности, на рис. 2.18 представлена КЭ-модель УКД, сформированная специально созданным для этого генератором.



Рис. 2.18. КЭ-модель и результаты расчета магнитного поля УКД

2.3. Программная реализация и апробация оптимизационной модели коллекторной машины

В качестве для апробации оптимизационной полевой модели КМ был выбран неявнополюсный двигатель постоянного тока серии 4П (высота оси вращения h = 80 мм, номинальная мощность $P_{\rm H} = 750$ Вт, номинальное напряжение 220 В, номинальная частота вращения $n_{\rm H} = 3000$ об/мин) [107].

КЭ-модель данной машины приведена на рис. 2.17, а. Анализ данной модели позволил выявить оптимальные параметры аппроксимации границ раздела сред, от которых зависит точность и скорость расчета. В частности, удалось минимизировать количество узлов конечно-элементной сетки, позволяющей сохранить точность расчета магнитного поля при минимальном времени расчета модели. Для этого была проведена серия расчетов при разном количестве узлов КЭ-сетки. Как видно из рис. 2.19, уже при количестве узлов КЭ-сетки в 3000 рассчитанная из полевой модели величина магнитного потока магнитного потока практически не изменяется. При этом время расчета модели с ростом количества узлов растет квадратично. При количестве узлов 1500 время расчета одного варианта составляет 2 – 3 сек, что допустимо в задачах оптимизации, при погрешности расчета магнитного потока, не превышающей 1 – 2 %, что является допустимым для инженерных расчетов.



Рис. 2.19. Результаты анализа расчетного времени t и точности расчета магнитного потока Ф в полевой модели при разном количестве узлов КЭ-сетки

Структура оптимизационной модели представлена на рис. 2.1. Ядром ее является VBA-макрос, реализующий поиск минимума произвольно заданной целевой функции с использованием двухостровной модели генетического алгоритма (ГА). Данная модель относится к самонастраивающимся моделям, не требующим подбора параметров для решения задачи. Достоинством ГА перед другими моделями является способность решать многоэкстремальные задачи с дискретными аргументами целевой функции. VBA-макрос, реализующий данный ГА, был разработан на основе процедуры, созданном в среде MatLab A.C. Зайцевым [23, 24, 25].

Целевая функции оптимизационной задачи строится на основе модуля, представляющего собой параметрический генератор КЭ-модели, описанный в 2.2. Модель генерируется на каждом шаге поиска оптимального решения и используется на этом же шаге для расчета магнитного поля при заданных значениях токов в обмотках. Результатом данного расчета является ряд величин, таких как значения потокосцеплений в обмотках машины (или даже в отдельных секциях), магнитный поток в зазоре, магнитная индукция в зоне коммутации, максимальная индукция в элементах модели и т.п. Целевая функция строится как из этих величин, так и из величин, подаваемых на вход ПГ КЭМ в виде (2.3), включающем возможность учета функциональных ограничений.

В частности, при апробации оптимизационной модели решалась задача поиска оптимальной конструкции статора двигателя 4П80. При этом функция цели имела вид

$$F\left(\vec{X}\right) = h_{c} + \begin{cases} k_{\Phi max} \left(\Phi - \Phi_{max}\right) \forall \Phi > \Phi_{max} \\ k_{\Phi min} \left(\Phi_{min} - \Phi\right) \forall \Phi < \Phi_{min} \\ 0 \forall \Phi_{min} < \Phi < \Phi_{max} \end{cases} + \begin{cases} k_{Bmax} \left(B - B_{max}\right) \forall B > B_{max} \\ k_{Bmin} \left(B_{min} - B\right) \forall B < B_{min} \\ 0 \forall B_{min} < B < B_{max} \end{cases}$$
(2.12)

где h_c – расстояние от оси машины до сечения спинки статора; Φ – средний магнитный поток на полюсном делении; В – средняя индукция в зоне коммутации; $\Phi_{min} = 0,99\Phi_{H}$; $\Phi_{max} = 1,1\Phi_{H}$; $B_{min} = 0$; $B_{max} = 0,05$ Тл – критериальные пределы по магнитному потоку и индукции в зоне коммутации; $k_{\Phi min} = 100$; $k_{Bmax} = 1000$; $k_{Bmin} = 100$; $k_{Bmax} = 1000$ – вестовые коэффициенты, значения

В

которых подбирались ходе серии расчетов.

Функция цели определяется минимальным значением величины h_c. Как следует из [94], именно эта величина определяет оптимальность конструкции статора неявнополюсной машины, так как косвенно учитывает экономию электротехниче-



Рис. 2.20. Внешний вид неявнополюсного ДПТ с оптимальным усечение спинки статора по [94].

ской стали за счет более оптимального раскроя (см. рис. 2.21), а также обеспечивает выравнивание электромагнитной нагрузки в спинке статора.



Рис. 2.21. Иллюстрация к расчету экономии стали

Критериальные ограничения функции цели (2.12) обеспечивают соответствие искомого варианта исходному варианту серийно выпускавшейся машины, то есть $\Phi \approx \Phi_{\rm H}$, $B \approx B_{3\kappa}$ – где $\Phi_{\rm H}$ и $B_{3\kappa}$ – соответственно номинальный магнитный поток и индукция в зоне коммутации, обеспечивающая ускоренную коммутацию в исходном варианте.

Также как и в [94] поиск оптимальной конструкции статора осуществлялся путем перераспределения витков ОВ и КО по пазам статора. В качестве варьируемых параметров выступали плотности полного тока в пазах на половине полюсного деления статора, вычисляемые по формуле

$$j_{p} = \frac{N_{fp}i_{f} + N_{kp}i_{a}}{S_{p}},$$
 (2.13)

где p – номер паза; N_{fp} и N_{kp} – количество витков соответственно OB и KO в p-м пазу; i_f и i_a – ток в OB и KO; S_p – площадь p-го паза.

Плотности полного тока паза на второй половине полюсного деления статора вычислялись по формуле

$$j_{z-p} = j_s - 2j_p,$$
 (2.14)

где z – количество пазов на полюсном делении статора; j_s – плотность полного тока паза статора в исходном варианте, которую по условиям эксперимента нельзя было превышать в целях соблюдения условий теплоотдачи, характерных для исходного варианта с учетом допущения об удовлетворительной теплоотдачи в пазах статора в исходном варианте. Так же, как и в [94] при решении задачи оптимизации статора неявнополюсной МПТ определялись оптимальные параметры усечения спинки статора. Однако, в отличие от [94] данная задача решалась с помощью параметрического генератора КЭ-модели с полной перестройкой пазов статора на каждом шаге поиска (в [94] усечение спинки статора достигалось смещением узлов спинки статора в пределах допустимых деформаций). Такая постановка задачи обеспечила возможность реализации пазов статора с различной высотой, что позволяет увеличить диапазон варьирования параметров усечения спинки статора.

CreateModel_4.xlsm - Microsoft Excel										٢	
Главная Вставка Разметка страницы Формулы Данные Рецензирование Вид Разработчик Надстройки 🤅									•		X
	Ê,	🖌 Arial Cyr 👻 10 👻 🗮	= = =	Общий	- A	¦а••• Встави	đ	n.			
	-	🚡 ж К Ч - А А 🛒 📰	≣ ≣ ⊡ -	- %	000	🌁 Удалит	u				
Вставить 🛷 🖂 - 🖓 - А - 🟥 💷 ?				◆,0 ,00 0,0 ,0	Стили	Форма	T. Q.	Сортиров и фильтр	(а Найтии ▼ выделить ▼		
Буфе	ep of	бмена 🖻 Шрифт 🖻 Выр	авнивание 🖻	Число	5	Ячейк	и	Редактир	ование		
	-	B2 -	fr	<u> </u>		A			×		
		52		-		0				IZ.	
	- A B C			E	F	G	н		J	ĸ	
2		Стартовая точка О	птимизация)	- 11	Расч	ет оптима					
3		Параметры обмоток	Имя	Ед.	Pmax						-
4	1	Максимальное число витков OB	Wfmax	-	448						
5	2	Максимальное число витков КО	Wkmax	-	43						
6	3	Максимальная плотность тока в пазу	Jmax	-	2246421						
7											
8		Варьнруемые параметры	Имя	Ед.	Pmin	Pmax	P 0	Ропт			
9	1	Величина зазора	delta	MM	0,3	3	0,40	0,40			
10	2	Расчетное количество пазов статора	ZS	-	12	84	36	36,0			
11	3	Высота паза статора	hp	MM	10	30	18,0	18,0			
12	- 4	Ширина зубца статора	bz	MM	2	20	3,00	3,00			
13	5	Высота спинки статора	hsp	MM	2	50	6,00	6,00			
14	6	Глубина усечения спинки статора	hssp	MM	0	50	0,00	0,00			
15	7	Ширина прорези в спинке статора	bpr	MM	0	15	0,00	0,00	Nob	Nко	
16	8	Относительная плотность тока 1-го паз	a J1	A/mm ²	0	1	0,940	0,940	421	3	
17	9	Относительная плотность тока 2-го паз	a J2	A/mm ²	0	1	0,000	0,000	0	43	
18	10	Относительная плотность тока 3-го паз	a J3	A/mm ²	0	1	0.940	0.940	421	3	t
19	11	Относительная плотность тока 4-го паз	a I4	A/mm ²	0	1	0.000	0.000	0	43	
20	12		a 15	Δ/mc^2	0	1	0,000	0,000	, i i i i i i i i i i i i i i i i i i i		
20	12		a 35	A/and ²	0	1	0,000	0,000	0	0	
21	15	Опносительная плотность тока 6-го паз	a 50	A /s = s ²	0	1	0,000	0,000	0	0	
22	14	Относительная плотность тока /-го паз	a J/	A/MM	0	1	0,000	0,000	U	0	
23	15	Относительная плотность тока 8-го паз	a J8	A/MM ⁻	0	1	0,000	0,000	0	0	
24	16	Относительная плотность тока 9-го паз	a J9	A/mm [*]	0	1	0,000	0,000	0	0	
25	17	Относительная плотность тока 10-го па	13a J10	A/mm ²	0	1	0,000	0,000	0	0	
26	-										
27	⊢	Функциональные ограничения	Имя	Ед.	Fmin	Fmax	FO	Гопт	NH	гер	
28	1	Магнитный поток	Φ	B6	0,00140	0,00143	0,00142	0,00000)	
29	2	Индукция в зоне коммутации	Взк	Тл	0,00000	0,07254	0,03627	0,00000			1
30						_					
31	_	Критерии функция цели	Имя	Ед.	FO	Гопт	Kmin	Kmax	Fu	лн	
32		Высота спинки	HS	MM	65,5			1	1.		
33	2	Штраф по магнитному потоку	dΦ	B6	0	0,00	1000	100	1,466	3971	
34	3	Штраф по индукции в зоне коммутаци	и dBзк	Тл	0,00	0,00	100	1			l
35									-		
36	-	Параметры оптимизации		Имя							
37	1	Количество итераций		Generation	5		-				
38	38 2 Passeep популяции PopulationSize 50										Y
	+ +	• ЭМ <u>Оптимизация /</u> ДПТ / УКД	🗶 Модель 🗶	Pt / Pa / Pl	c ∕ Fi ∕ Mer	п / Вариа					
Готово 🔛 🛄 100% 😑 – 🤍											/ .::

Рис. 2.22. Подсистема структурно-параметрической оптимизации КМ

Таким образом, в число варьируемых параметров исследуемого МПТ 4П80 вошли 4 плотности тока в пазах на половине полюсного деления статора j_p (p = 1 - 4), расстояние от оси машины до сечения спинки статора h_c и внешний радиус статора R_c (см. рис. 2.20, 2.21). Всего 6 варьируемых параметров, на которые наложены параметрические ограничения вида (2.1).

Для формулировки и решения оптимизационной задачи был разработан интерфейс, представленный на рис. 2.22. Данный интерфейс позволяет расширить список варьируемых параметров, добавив в него такие параметры, как величина зазора, количество пазов статора на полюсном делении, ширина зубца статора, ширина прорези в спинке статора и т.д. Такая детальная постановка задачи позволяет решать задачи поиска оптимальной конструкции статора при проектировании новых серий машин. В нашем случае задача была ограничена 6-ю варьируемыми параметрами в целях поиска способов улучшения конструкции статора существующей машины.



Рис. 2.23. Вариант машины, найденный в ходе оптимизации

При решении оптимизационной задачи получен вариант конструкции машины, представленный на рис. 2.23.

В полученном варианте было достигнуто уменьшение величины h_c на 23,5%, что позволяет экономить электротехническую сталь на 23% и более. Результат, полученный в [94] составлял всего 4,8%. Более высокая экономия получена за счет неравномерной высоты пазов статора, что в свою очередь обеспечивалось более гибкой конструкцией разработанного в данной диссертации параметрического генератора КЭ-модели. Обмотки статора распределены в два слоя, обеспечивая требуемый магнитный поток $\Phi \approx \Phi_{\rm H}$ и требуемую индукцию в зоне коммутации В $\approx B_{3\kappa}$. Решение аналогичной задачи с требованием наличия однослойных обмоток статора привело к решению, дающему 4,1% снижения величины h_c (хотя результат получился ниже, чем в [94], тем не менее, полученный нами вариант более технологичен).

Выводы по второй главе

1. Использование конечно-элементной модели при поиске оптимальной конструкции электрической машины позволяет перевести задачу в разряд структурно-параметрического синтеза, позволяющего искать лучшие варианты конструкции методами параметрической оптимизации. В качестве варьируемых параметров при этом могут быть использованы величины, определяющие геометрию расчетной области при автоматической генерации конечно-элементной модели.

2. Предложенный вариант декомпозиции машины позволил достичь максимальной гибкости построения расчетной области при минимальном количестве входных параметров ПГ КЭМ КМ. В частности, практически все многообразие пазов статора удалось свести к комбинации четырех типовых компонентов, каждый из которых реализуется 3 – 4-мя исполнениями. Кроме того, добавлены нетиповые технологические выемки и усечения, которые способны повлиять на синтез оптимального варианта. Библиотека данных

элементов легко расширяется в процессе дальнейшего развития системы проектирования КМ. В результате создана подсистема ПГ КЭМ КМ, позволяющая охватить практически полный спектр возможных типоисполнений явнополюсных и неявнополюсных машин.

3. Принципиальный подход к решению поставленной оптимизационной задачи был проработан уже в рамках работы [94]. Практическая значимость результата, полученного в данной диссертации, состоит в разработке готовой версии программного продукта, который может быть использован без изменений при решении обозначенного класса оптимизационных задач при проектировании КМ. Научная новизна оптимизационной модели, разработанной в данной диссертации, определяется именно гибкостью параметрического генератора, позволяющего выйти на задачи структурнопараметрического синтеза КМ.

4. В немалой степени решению задачи структурно-параметрического синтеза способствовало использование в оптимизационной модели генетических алгоритмов вместо методов нелинейного программирования, использованных в [94], что также является элементом научной новизны данной диссертации. Это позволило решить оптимизационную задачу с учетом дискретности (вплоть до разрывов) и многоэкстремальности целевой функции, от чего невозможно избавиться при структурно-параметрическом синтезе.

5. Апробация оптимизационной модели на примере неявнополюсной КМ показала возможность существенно улучшить результат оптимизации по сравнению с результатами, приведенными в [94] (экономия электротехнической стали увеличилась более чем в 4 раза), что является доказательством более высокой эффективности разработанной оптимизационной модели разработанного на их основе программного продукта.

3. Разработка методики построения и исследования полевых динамических моделей для решения задач анализа коллекторных машин

3.1. Адаптация полевой динамической модели коллекторной машины к имитационным пакетам

В основе ПДМ КМ, позволяющей имитировать режимы работы КМ нетиповой конструкции, лежит технология моделирования динамических режимов электромеханических устройств, разработанная в [94]. Данная технология предполагает проведение серий расчетов конечно-элементной модели квазистационарного магнитного поля проектируемого устройства с последующей аппроксимацией результатов многомерными сплайнами, используемыми при вычислении коэффициентов уравнений динамики устройства на каждом шаге интегрирования по времени. Эта технология была успешно опробована при моделировании различных электромеханических устройств, основанных на индукционном принципе действия, в частности, асинхронных машин [10, 11], трансформаторов [32, 53] и токоограничивающих реакторов [26, 86]. При этом были выявлены некоторые особенности, которые необходимо учитывать при разработке моделей с использованием данной технологии. Доработка предложенной в [94] ПДМ КМ с учетом выявленных особенностей, а также ее адаптация к современным технологиям имитационного моделирования является одной из задач данной диссертации.

Основной задачей разработки методики построения и исследования полевых динамических моделей для решения задач анализа коллекторных машин является определение достоинств и недостатков цепных и полевых моделей КМ при проектировании машин нетиповой конструкции. На основании выбранных моделей необходимо разработать не только методику проектирования КМ, но и программный продукт, позволяющий ее реализовать. Особое внимание при проектировании КМ нетиповой конструкции следует уделить их динамическим режимам с последующим проведением экспериментов по включении таких машин в системы управления электроприводами.

ПДМ КМ с последовательным возбуждением и с постоянными магнитами строится на основе системы нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений (1.20) приведенной к виду

$$\begin{bmatrix} L_{a}(i_{a},\alpha) & C_{a}(i_{a},\alpha) & 0\\ 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{cases} \frac{di_{a}(t)}{dt} \\ \frac{d\alpha(t)}{dt} \\ \frac{d\omega(t)}{dt} \\ \frac{d\omega(t)}{dt} \end{cases} = \begin{cases} u(t) - R_{a} \cdot i_{a}(t) \\ \omega(t) \\ \frac{M(i_{a},\alpha) - M_{0} - M_{H}}{J} \end{cases}.$$
 (3.1)

В случаем КМ с параллельным и независимым возбуждением система уравнений (1.20) принимает вид

$$\begin{bmatrix} L_{\rm ff}(i_{\rm f},i_{\rm a},\alpha) & L_{\rm fa}(i_{\rm f},i_{\rm a},\alpha) & C_{\rm f}(i_{\rm f},i_{\rm a},\alpha) & 0\\ L_{\rm af}(i_{\rm f},i_{\rm a},\alpha) & L_{\rm aa}(i_{\rm f},i_{\rm a},\alpha) & C_{\rm a}(i_{\rm f},i_{\rm a},\alpha) & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\mathrm{d}i_{\rm f}}{\mathrm{d}t}\\ \frac{\mathrm{d}a}{\mathrm{d}t}\\ \frac{\mathrm{d}\alpha}{\mathrm{d}t}\\ \frac{\mathrm{d}\alpha}{\mathrm{d}t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{\rm f}(t) - R_{\rm f}i_{\rm f}(t)\\ u_{\rm a}(t) - R_{\rm a}i_{\rm a}(t)\\ \\ \\ \frac{\mathrm{M}(i_{\rm f},i_{\rm a},\alpha) - \mathrm{M}_{\rm 0} - \mathrm{M}_{\rm H}}{\mathrm{J}} \end{bmatrix},$$

(3.2)

Следует отметить, что (3.1) и (3.2) отличается от (1.10) и (1.11) тем, что элементы матрицы коэффициентов и электромагнитный момент машины М зависят от токов в цепях ОВ и ОЯ, а также от угла поворота α. Кроме того в (3.2) в отличие от (1.11) присутствуют взаимные индуктивности между обмотками, включенными в цепи ОВ и ОЯ.

Учитывая (1.18) и (1.20) для расчета элементов матриц коэффициентов в (3.1) и (3.2) используем формулы

$$L_{a} = \frac{\partial \left(\Psi_{aw}(i_{a},\alpha) + \Psi_{sw}(i_{a},\alpha)\right)}{\partial i_{a}}, \quad C_{a} = \frac{\partial \left(\Psi_{aw}(i_{a},\alpha) + \Psi_{sw}(i_{a},\alpha)\right)}{\partial \alpha}, \quad (3.3)$$

$$L_{ff} = \frac{\partial \Psi_{f}(i_{f}, i_{a}, \alpha)}{\partial i_{f}}, \quad L_{fa} = \frac{\partial \Psi_{f}(i_{f}, i_{a}, \alpha)}{\partial i_{a}}, \quad C_{f} = \frac{\partial \Psi_{f}(i_{f}, i_{a}, \alpha)}{\partial \alpha},$$

$$L_{af} = \frac{\partial \Psi_{a}(i_{f}, i_{a}, \alpha)}{\partial i_{f}}, \quad L_{aa} = \frac{\partial \Psi_{a}(i_{f}, i_{a}, \alpha)}{\partial i_{a}}, \quad C_{a} = \frac{\partial \Psi_{a}(i_{f}, i_{a}, \alpha)}{\partial \alpha},$$

$$\Psi_{a}(i_{f}, i_{a}, \alpha) = \Psi_{aw}(i_{f}, i_{a}, \alpha) + \Psi_{sw}(i_{f}, i_{a}, \alpha) + \Psi_{kw}(i_{f}, i_{a}, \alpha) + \Psi_{dw}(i_{f}, i_{a}, \alpha), \quad (3.5)$$

где индексы aw, sw, kw, dw относятся соответственно с ОЯ, СО, КО и ОДП; для КМ со скосом пазов якоря на угол зубцового деления

$$L_{a} = L_{a}(i_{a}), C_{a} = C_{a}(i_{a}),$$

$$L_{ff} = L_{ff}(i_{f}, i_{a}), L_{fa} = L_{fa}(i_{f}, i_{a}), L_{af} = L_{af}(i_{f}, i_{a}), L_{aa} = L_{aa}(i_{f}, i_{a}), C_{f} = 0.$$
(3.6)



Рис. 3.1. Внешний подсистемы исследования имитационных моделей КМ с последовательным возбуждением в среде Simulink

Для решения системы уравнений (3.1) КМ с последовательным возбуждением (на примере УКД) в среде MatLab Simulink была разработана структурная модель (рис. 3.1), которая используется как для исследования различных типов динамических моделей КМ с последовательным возбуждением, так и в качестве подсистемы имитации эксперимента в САПР УКД при работе машины как на постоянном, так и на переменном токе. Здесь приведены три типа моделей УКД, отличающиеся сложностью и точностью, определяемой набором принятых допущениями.

Упрощенная динамическая модель (УДМ) УКД является традиционной инженерной моделью, построенной по (1.10), в которой учтена нелинейность кривой намагничивания КМ. При построении данной модели по паспортным данным машины чаще всего используется типовая кривая, заданная в относительных единицах. Однако при проектировании рекомендуется строить данную кривую по результатам расчета магнитного поля на модели, сгенерированной по результатам проектного расчета. В уточненной модели УКД помимо данной кривой намагничивания вводится блок расчета ЭДС вращения ОЯ по результатам расчета магнитного поля.



Рис. 3.2. ПДМ КМ с последовательным возбуждением в среде Simulink

Точная ПДМ УКД строится по (3.1). Ядром данной модели является блок УКД, содержимое которого представлено на рис. 3.2. Данный блок использован при моделировании электроприводов на базе УКД с использованием библиотеки SimPowerSystems. Главная наукоемкая составляющая ПДМ УКД является «блок табличных зависимостей», предназначенных для вычисления коэффициентов (3.3) системы ОДУ (3.1) при текущих значениях тока ОЯ i_a и угла поворота якоря α на каждом шаге интегрирования по времени. Собственно матрица коэффициентов формируется средствами матричной конкатенации Simulink. В блоке решения системы ОДУ осуществляется инвертирование сформированной матрицы коэффициентов, умножение ее на вектор, сформированный в «блоке формирования вектора правых частей» и интегрирование полученного таким образом вектора производных от искомых величин по времени.

Аналогичная модель может быть создана средствами любого имитационного пакета. Для примера на рис. 3.3 приведена ПДМ УКД, созданная средствами открытого пакета SciLab Xcos.

Следует отметить, что приведенная на рис. 3.1 – 3.3 модель применима для любых КМ с последовательным возбуждением или постоянными магнитами, независимо от особенностей их конструкции.



Рис. 3.3. ПДМ КМ с последовательным возбуждением в среде в среде Хсоз



Рис. 3.4. Внешний вид подсистемы исследования имитационных моделей КМ с независимым, параллельным и смешанным возбуждением в среде Simulink



Рис. 3.5. ПДМ КМ с независимым, параллельным и смешанным возбуждением в среде Simulink



Рис. 3.6. ПДМ КМ с независимым, параллельным и смешанным возбуждением в Хсоз

Аналогичная модель для исследования динамических режимов машин с независимым, параллельным и смешанным возбуждением приведена на рис. 3.4 - 3.6 [65, 78, 79, 84]. Отличием от рис. 3.1 - 3.3 является то, что матрица коэффициентов имеет размер 4×4 . Коэффициенты (3.4) рассчитываются с помощью блоков табличных зависимостей при текущих значениях тока OB i_f, тока OЯ i_a и угла поворота якоря α на каждом шаге интегрирования по времени. При этом в отличие от упрощенной модели, построенной по (1.11), расчет осуществляется с учетом взаимных индуктивностей и особенностей конструкции КМ.

69

3.2. Методика обучения полевой динамической модели коллекторной машины

Под обучением ПДМ КМ понимается формирование матриц для блоков табличных зависимостей, реализуемых в моделях рис. 3.1. – 3.6, используемых для вычисления коэффициентов (3.3) – (3.4) на каждом шаге интегрирования по времени уравнений динамики КМ.

Для обучения ПДМ КМ в [94] предлагается осуществить серию расчетов магнитного поля КМ при разных положениях якоря относительно индуктора и разных значениях токов в цепях ОВ и ОЯ. Для этого в выбранной системе программирования (обычно VB for Excel) пишется подпрограмма (рис. 3.7), осуществляющая перебор вариантов при всех сочетаниях таблично заданных значений токов $i_{ft} = -i_{fmax} \dots + i_{fmax}, i_{at} = 0 \dots + i_{amax}$ и положений якоря $\alpha_t = 0...\alpha_z$, где i_{fmax} , i_{amax} – максимальные значения токов в цепях ОВ и ОЯ; а_z – угол зубцового деления якоря. При всех сочетаниях значениях



Рис. 3.7. Алгоритм обучения ПДМ КМ с вычислением частных производных по сплайнам

 $(i_{ft}, i_{at}, \alpha_t)$ с помощью библиотеки EMLib рассчитывается магнитное поле и определяются потокосцепления обмоток; потокосцепление в цепи ОЯ рассчитывается по формуле (3.5) (при повороте якоря на угол α_t вследствие наличия коллектора секции ОЯ перераспределяются по параллельным ветвям; токи в коммутирующих секциях задаются исходя из допущения о линейном характере коммутации; за это отвечает библиотека EMLib).

Полученные матрицы потокосцеплений в цепях ОВ и ОЯ аппроксимируются трехмерными сплайнами, по которым в точках (i_{ft} , i_{at} , α_t) определяются частные производные (3.3) – (3.4): $L_{ff}(i_{ft},i_{at},\alpha_t)$, $L_{fa}(i_{ft},i_{at},\alpha_t)$, $L_{af}(i_{ft},i_{at},\alpha_t)$, $L_{aa}(i_{ft},i_{at},\alpha_t)$, $C_{f}(i_{ft},i_{at},\alpha_t)$, $C_{a}(i_{ft},i_{at},\alpha_t)$. Полученные матрицы частных производных аппрокимируются сплайнами, по ним рассчитываются коэффициенты систем уравнений (3.1) – (3.2) на каждом шаге интегрирования по времени.

Одной из основных проблем описанной технологии моделирования динамики КМ является возможность возникновения недопустимых осцилляций при сплайновой аппроксимации матриц потокосцеплений. Это приводит к необходимости тщательного подбора табличных значений независимых переменных i_{ft} , i_{at} , α_t , что усложняет алгоритм и увеличивает время обучения модели. Поэтому, например, в [32] предлагается использовать линейную аппроксимацию матриц потокосцеплений. Но это также негативно отражается на точности обучения модели, так как при дифференцировании могут возникать недопустимые погрешности в определении коэффициентов (3.3).

В [11] при моделировании динамики асинхронной машины с обращением к полевой модели на каждом шаге интегрирования было использовано численное приближение частных производных

$$L_{pq} = \frac{\partial \Psi_{p}}{\partial i_{q}} \approx \frac{\Delta \Psi_{p}}{\Delta i_{q}} \bigg|_{\substack{i_{r} = \text{const} \forall r \neq q \\ \mu_{s} = \text{const} \forall s = 1 \dots N_{e}}}, \quad C_{p} = \frac{\partial \Psi_{p}}{\partial \alpha} \approx \frac{\Delta \Psi_{p}}{\Delta \alpha} \bigg|_{\substack{i_{r} = \text{const} \forall r \neq q \\ \mu_{s} = \text{const} \forall s = 1 \dots N_{e}}}.$$
 (3.7)

Было выявлено, что использование данного приближения позволяет получить допустимую точность расчетов при хорошей сходимости расчетного процесса даже в достаточно сложном для моделирования случая асинхронным машин с короткозамкнутым ротором.

Учитывая данные результаты было решено проводить обучением ПДМ КМ на основании допущения о линейном приближении частных производ-

ных, что существенно упрощает алгоритм обучении ПДМ КМ при использовании в САПР. Блок-схема разработанного алгоритма обучения ПДМ КМ приведена на рис. 3.8. Здесь для расчета коэффициентов (3.3) – (3.4) сначала решается нелинейная полевая задача при заданном сочетании значений независимых переменных i_{ft} , i_{at} , α_t . После этого решаются три линейные полевые задачи при неизменных значениях магнитной проницаемости μ_s = const во всех N_e элементах конечно-элементной сетки:

- 1) при $i_f = i_f + \Delta i_f$, $i_a = i_a$, $\alpha = \alpha$;
- 2) при $i_f = i_f$, $i_a = i_a + \Delta i_a$, $\alpha = \alpha$;
- 3) при $i_f = i_f$, $i_a = i_a$, $\alpha = \alpha + \Delta \alpha$.

В последнем случае якорь поворачивается относительно текущего положения на угол Δα с последующей перегенерацией конечно-элементной сетки в воздушном зазоре без перераспределения секций ОЯ по параллельным ветвям.

Следует отметить, что линейная задача решается за одну итерацию метода Ньютона в методе конечных элементов. Поэтому дополнительные расчеты магнитного поля лишь незначительно увеличивают расчетное время, затрачиваемое на обучение модели, а отсутствие многомерных сплайнов снижает трудоемкость реализации алгоритма обучения.

По рассчитанным на текущей итерации значениям потокосцеплений



Рис. 3.8. Алгоритм подсистемы обучения ПДМ КМ с линейным приближением частных производных
в цепях ОВ и ОЯ $\Delta \Psi_p$ и приращениям токов Δi_q и угла $\Delta \alpha$ по (3.7) рассчитываются соответствующие коэффициенты.

Следует отметить, что для обучения ДПМ КМ достаточно осуществлять смещение якоря на угол $\Delta \alpha$ лишь в пределах зубцового деления $\alpha_z = \frac{2\pi}{Z}$, где Z – количество зубцов якоря. Реальный угол поворота якоря в процессе вращения изменяется в пределах $-\infty \le \alpha \le +\infty$. Для отображения реального угла α на диапазон табличных значений α_z используется формула

$$\alpha_{t} = \alpha - \alpha_{z} \cdot \begin{cases} \left\lfloor \frac{\alpha}{\alpha_{z}} \right\rfloor \forall \alpha \ge 0 \\ \left\lfloor \frac{\alpha}{\alpha_{z}} \right\rfloor \forall \alpha < 0 \end{cases},$$
(3.8)

где операторы [] и | используются для округления числа до ближайшего целого соответственно в меньшую и большую стороны.

Если в КМ отсутствует скос пазов якоря, то никаких дополнительных пересчетов при определении потокосцеплений обмоток не требуется. При наличии скоса пазов якоря на угол β в алгоритме обучения ПДМ КМ на каждой t-й итерации осуществляется усреднение величины потокосцепления каждой p-й обмотки в пределах угла скоса

$$\Psi_{pt} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N} \Psi_{ptk} \left(\alpha_{tk} \right) \Big|_{\substack{\forall \alpha_{tk} = k\Delta\alpha - \frac{\beta}{2} \\ N = \frac{\beta}{\Delta\alpha}, \, \alpha_{tk} \le \beta}},$$
(3.9)

где $\Delta \alpha$ – шаг поворота якоря в серии расчетов магнитного поля (величину $\Delta \alpha$ желательно выбирать кратной зубцовому делению α_z и углу скоса пазов β); $\Psi_{ptk}(\alpha_{tk})$ – потокосцепление р-й обмотки при сдвиге якоря на угол α_{tk} по отношению к основному положению α_t на t-й итерации обучающей серии расчетов.

Обычно величина скоса пазов выбирается из условия $\beta = \alpha_z$. При этом устраняется влияние зубчатости якоря на ЭДС неподвижных в пространстве обмоток статора. При этом выполняются условия (3.6), и ДПМ КМ упроща-

ется (см. рис. 3.1 - 3.6). В противном случае в модели рис. 3.2 - 3.3 появляется дополнительный блок табличной зависимости $C_f(i_f, \alpha)$, а все остальные табличные блоки получают дополнительный вход по углу α . В модели рис. 3.5 - 3.6 также появляется дополнительный блок табличной зависимости $C_f(i_f, i_a, \alpha)$, а все остальные табличные блоки становятся трехвходовыми вследствие наличия дополнительного входа по углу α .

Необходимо добавить, что расчет индуктивностей в цепях ОВ и ОЯ, осуществляемый по (3.7) на основе расчетов магнитного поля методом конечных элементов на 2D-модели, не учитывает потоков рассеяния лобовых частей обмоток машины. Поэтому при расчете диагональных элементов матриц коэффициентов систем уравнений (3.1) – (3.2) необходимо осуществить коррекцию

$$\begin{split} L_{a}(i_{a},\alpha) &\approx \frac{\Delta \Psi_{a}}{\Delta i_{a}} \bigg|_{i_{f}=const} + L_{aw\pi} + L_{sw\pi}, \\ L_{ff}(i_{f},i_{a},\alpha) &\approx \frac{\Delta \Psi_{f}}{\Delta i_{f}} \bigg|_{i_{a}=const} + L_{fw\pi}, \\ L_{aa}(i_{f},i_{a},\alpha) &\approx \frac{\Delta \Psi_{a}}{\Delta i_{a}} \bigg|_{i_{f}=const} + L_{aw\pi} + L_{sw\pi} + L_{sw\pi} + L_{dw\pi}, \end{split}$$
(3.10)

где L_{аwл}, L_{fwл}, L_{swл}, L_{kwл}, L_{dwл} – индуктивности лобового рассеяния соответственно ОЯ, ОВ, СО, КО и ОДП, рассчитанные по инженерным методикам. Так, в [104] для вычисления индуктивности лобового рассеяния р-й обмотки предлагается формула, которая после приведения принимает вид

$$L_{p\pi} = 0.68 \frac{\mu_0 \beta \tau}{p} \left(W_p k_{0p} \right)^2 \sqrt{\frac{l_B}{\beta \tau} + 0.1}, \qquad (3.11)$$

где μ_0 – магнитная постоянная; β – относительный шаг обмотки; τ – полюсное деление, м; р – число пар полюсов; W_p – число витков в обмотке; k_{0p} – обмоточный коэффициент; $l_{\rm B}$ – длина вылета лобовых частей.

3.3. Методика расчета параметров динамических моделей коллекторных машин по паспортным данным

Разрабатываемая методика моделирования динамических режимов применима как при проектировании КМ, так и при проектировании электроприводов на базе КМ. В первом случае геометрия расчетной области полевой модели КМ оказывается полностью определенной результатами проектного расчета. Построение и обучение ПДМ КМ для данного случая описано в предыдущих разделах диссертации. При проектировании же электроприводов детальная конструкция используемой КМ зачастую оказывается неизвестной, и информация о ней ограничена паспортными данными и внешними размерами, в частности установочными. В этом случае точную полевую модель построить невозможно, однако можно построить модель, точность которой существенно превышает точность традиционных инженерных моделей, приближаясь к точности полевой модели. Для этого в данной диссертации предлагается два пути:

- расчет существующей КМ по инженерной методике, заложенной в разрабатываемой в данной диссертации САПР КМ, с последующей генерацией полевой модели и обучением точной ПДМ КМ;
- создание уточненной ПДМ КМ по паспортным данным существующей КМ и полевой модели известного аналога.

В первом случае по отношению к КМ реализуется подход, впервые предложенный в [33] в отношении силовых трансформаторов. При этом существующее устройство рассчитывается по традиционной инженерной методике. В качестве технического задания принимаются паспортные данные существующей КМ. При принятии проектных решений необходимо стремиться к полному соответствию параметров и внешних размеров рассчитываемого устройства параметрам и размерам существующей КМ. Любая дополнительная информация известная о рассчитываемом устройстве (количество пар полюсов, количество пазов на статоре и роторе, длина пакета якоря и статора и т.п.), например, в результате его частичной разборки, также должна быть учтена при принятии проектных решений. В остальном необходимо руководствоваться рекомендациями принятой инженерной методики проектирования (как правило, эти рекомендации повторяются в разных методиках). Все это способствует получению варианта проекта, в максимальной степени соответствующего существующей КМ. После этого полученный проект используется для генерации полевой модели и построения точной ПДМ КМ по описанной выше методике.

Более простой, но менее точный вариант ПДМ КМ строится по паспортным данным, если известен аналог существующей КМ, для которого уже построена точная ПДМ КМ. В качестве аналога используется, например, КМ той же серии, но с другими паспортными данными. Если таковая отсутствует, то в качестве аналога воспользуемся моделью машины, принадлежащей к аналогичному классу машин (явнополюсная или неявнополюсная, УКД или МПТ, с ОВ или постоянными магнитами, с пазами на якоре или с гладким якорем и т.п.). Для этого мы рекомендуем следующую методику.

Сначала рассчитываем параметры КМ. Для это используем паспортные данные [90]: P_n – номинальная мощность, Вт; U_n – номинальное напряжение, В; n_n – номинальная частота вращения, об/мин; η_n – КПД в номинальном режиме, o.e.; I_{fn} – номинальный ток OB (для КМ с независимым и параллельным возбуждением).

По ним вычисляется номинальный ток двигателя, А

$$I_n = \frac{P_n}{U_n \cdot \eta_n}, \qquad (3.12)$$

номинальный ток якоря КМ

• с параллельным возбуждением, А

$$\mathbf{I}_{an} = \mathbf{I}_{n} - \mathbf{I}_{fn} , \qquad (3.13,a)$$

• с последовательным возбуждением, А

$$I_{an} = I_n, \ I_{fn} = I_n$$
 (3.13,6)

номинальную частоту вращения, рад/с

$$\omega_{\rm n} = \frac{\pi n_{\rm n}}{30}, \qquad (3.14)$$

номинальный момент, Н м

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n}, \qquad (3.15)$$

произведение константы конструкции машины на номинальный поток, Вб

$$C\Phi_n = \frac{M_n}{I_{an}},$$
(3.16)

номинальную ЭДС якоря, В

$$\mathbf{E}_{\mathrm{an}} = \mathbf{C}\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{n}}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{n}}\,,\tag{3.17}$$

сопротивление в цепи ОЯ, Ом

$$R_{a} = \frac{U_{n} - E_{an}}{I_{an}},$$
(3.18)

сопротивление в цепи ОВ (для КМ с параллельным или независимым возбуждением), Ом

$$R_{f} = \frac{U_{n}}{I_{fn}}.$$
(3.19)

Для вычисления индуктивности ОЯ в номинальном режиме используется полуэмприческая формула Уманского-Линвелля [66, 68]

$$L_{an} = \frac{kU_n}{pI_{an}\omega},$$
(3.20)

где p – число пар полюсов; k – коэффициент пропорциональности, значение которого равно $k_a = 0,5 - 0,6$ для некомпенсированных машин и k = 0,1 для компенсированных машин [68].

Индуктивность OB в номинальном режиме рассчитывается исходя из приблизительного отношения постоянных времени OЯ T_a и OB T_f

$$k_{af} = \frac{T_a}{T_f}.$$
(3.21)

Для компенсированных машин приниематся $k_{af} = 0,02$, для некомпенсированных – $k_{af} = 0,05$ [66]. При этом индуктивность OB

$$L_{\rm fn} = \frac{L_{\rm an}}{k_{\rm af}} \frac{R_{\rm f}}{R_{\rm a}} \,. \tag{3.22}$$

Для вычисления момента инерции якоря в [21] предлагается формула

$$J \approx 800 \cdot D_a^4 l_a, \text{ Kr}\text{ M}^2 \tag{3.23}$$

где D_a – диаметр якоря, м; l_a – длина пакета якоря, м.

В случае УКД принимается $I_{fn} = 0$, $I_{an} = I_n$, $R_f = 0$, $L_f = 0$.

Кривая намагничивания машины в форме $C\Phi_n = f(I_f)$ строится обычно по двум точкам: (0,0) и ($C\Phi_n, I_{fn}$). Вторая точка лежит на колене кривой намагничивания, форма которой обычно мало отличается в разных машинах и в относительных единицах представлена на рис. 3.9



Рис. 3.9. Универсальная кривая намагничивания КМ

[100]. Данная кривая должна быть пересчитана в реальные единицы.

Полученных данных достаточно для построения упрощенных нелинейных динамических моделей КМ, представленных на рис. 3.1 и 3.4. Для построения уточненных ПДМ КМ целесообразно воспользоваться положениями теории подобия [13, 28, 91]. Рассмотрим методику построения ПДМ КМ на примере КМ со смешанным возбуждением со скосом пазов.

Пусть имеется машина-аналог, для которой построены матрицы коэффициентов (3.4) с учетом (3.6) и (3.7) (имена величин машины-аналога будем записывать со штрихами). Примем допущение, что машина-аналог подобна машине-оригиналу (имена величин машины-оригинала будем записывать без штрихов). Это значит, что соответствующие величины модели X'_k и оригинала X_k связаны друг с другом масштабами подобия

$$m_k = \frac{X'_k}{X_k} = \text{const}.$$
(3.24)

Это справедливо и для номинальных значений, что позволяет по известным номинальным токам и собственным индуктивностям ОВ и ОЯ вычислить соответствующие масштабы

$$m_{ia} = \frac{i'_{an}}{i_{an}}, \quad m_{if} = \frac{i'_{fn}}{i_{fn}}, \quad m_{Lff} = \frac{L'_{ff}(i'_{fn}, i'_{an})}{L_{fn}}, \quad m_{Laa} = \frac{L'_{aa}(i'_{fn}, i'_{an})}{L_{an}}.$$
 (3.25)

Для индуктивностей модели и оригинала справедливо

$$L'_{fa} = \frac{\partial \Psi'_{f}}{\partial i'_{a}} = \frac{\partial (m_{\Psi f} \Psi_{f})}{\partial (m_{ia} i_{a})} = \frac{m_{\Psi f}}{m_{ia}} \frac{\partial \Psi_{f}}{\partial i_{a}} = \frac{m_{\Psi f}}{m_{ia}} L_{fa},$$

$$L'_{ff} = \frac{m_{\Psi f}}{m_{if}} L_{ff} = m_{Lff} L_{ff}, \quad L'_{aa} = \frac{m_{\Psi a}}{m_{ia}} L_{aa} = m_{Laa} L_{aa},$$

$$L'_{af} = \frac{m_{\Psi a}}{m_{if}} L_{af} = m_{Laf} L_{af}.$$
(3.26)

Учитывая (3.1.14) рассчитываем неизвестные масштабы

$$m_{\Psi f} = m_{Lff} m_{if}, \quad m_{\Psi a} = m_{Laa} m_{ia}.$$
 (3.27)

Аналогично, принимая m_a = 1 (углы инвариантны), получаем

$$C'_{f} = \frac{\partial \Psi'_{f}}{\partial \alpha'} = \frac{\partial (m_{\Psi f} \Psi_{f})}{\partial (m_{\alpha} \alpha)} = m_{\Psi f} C_{f}, \quad C'_{a} = m_{\Psi a} C_{a},$$

$$M' = \frac{\partial (\Psi'_{a} i'_{a})}{\partial \alpha'} = \frac{\partial (m_{\Psi a} m_{ia} \Psi_{f} i_{a})}{\partial (m_{\alpha} \alpha)} = m_{\Psi a} m_{ia} M.$$
(3.28)

В результате получаем

$$L_{pq}(i_{f}, i_{a}) = \frac{L'_{pq}(i_{f} / m_{if}, i_{a} / m_{ia})}{m_{Lpq}} \\ C_{p}(i_{f}, i_{a}) = \frac{C'_{p}(i_{f} / m_{if}, i_{a} / m_{ia})}{m_{\Psi p}} \Big|_{\substack{p=f, a \\ q=f, a}},$$
(3.29)

$$M(i_{f}, i_{a}) = \frac{M'(i_{f}/m_{if}, i_{a}/m_{ia})}{m_{\Psi a}m_{ia}}.$$
(3.30)

Полученная модель является ПДМ КМ с точностью до принятых допущений о подобии двух машин. Понятно, что данное допущение не всегда корректно. Однако если обе машины имеют одинаковое конструктивное исполнение, то полученная модель учитывает особенности этих исполнений.

3.4. Апробация полевой динамической модели коллекторной машины

3.4.1. Полевая динамическая модель УКД

В качестве объекта для апробации ПДМ КМ с последовательным возбуждением был выбран УКД, параметры которого приведены в главе 2 [57, 58, 65]. С помощью параметрического генератора для него была построена конечно-элементная модель магнитного поля рис. 2.18.



Рис. 3.10. Результаты обучения МПД УКД

Для обучения ПДМ УКД организована серия расчетов магнитного поля при разных сочетаниях таблично заданных значений тока ОЯ $0 \le i_{at} \le +i_{amax}$ и угла поворота $0 \le \alpha_t \le \alpha_z$. По результатам расчетов рассчитывалась индуктив-

ность в цепи ОЯ $L_{at}(i_{at},\alpha)$, коэффициент ЭДС $C_{at}(i_{at},\alpha)$ и момент $M_t(i_{at},\alpha)$. Так как в машине реализован скос пазов на величину зубцового деления, то все величины в пределах зубцового деления усреднялись по (3.9). В результате из полученных матриц была устранена зависимость от α , после чего полученные зависимости приобрели вид кривых $L_a(i_a)$, $C_a(i_a)$ и $M(i_a)$, представленных на рис. 3.10.



Рис. 3.11. Результаты пуска УКД на постоянном токе, полученные на упрощенной модели (точки), уточненной модели (пунктир) и полевой динамической модели УКД (сплошная линия): a) n(t); б) i_a(t)



Рис. 3.12. Результаты пуска УКД на переменном токе

Результаты моделирования пуска УКД представлены на рис. 3.11 (работа на постоянном токе) и рис. 3.12 (работа на переменном токе).

Анализ результатов показывает, что при пуске УКД на постоянном токе все модели демонстрируют примерно одинаковый результат, но на переменном токе упрощенные модели дают существенную погрешность по скорости.

Адекватность расчетной модели была проверена на разработанной в ИГЭУ экспериментальной установке на основе контроллера Arduino [59, 56, 76] (см. приложение П.1). Данная установка позволила снять несколько кривых пуска (рис. 3.13) исследуемого УКД на постоянном напряжении 150 В, 160 В и 170 В (регулируемое напряжение 220 В на выходе широкоимпульсного блока питания получить не удалось). На рис. 3.14. приведены две кривые изменения тока двигателя во времени при пуске. Первая кривая – оригинальная зависимость, снятая в ходе эксперимента, вторая – эта же кривая, обработанная с помощью фильтров, удалившего флуктуации кривой, вызванные неидеальностью формы напряжения, полученного с выпрямителя и коммутацией.



Рис. 3.13. Кривые зависимости тока УКД от времени в процессе пуска в режиме холостого хода на разные напряжения



Рис. 3.14. Исходная и сглаженная кривые тока УКД при пуске при U = 170 В



Рис. 3.15. Сравнение опытной и расчетной кривых тока УКД при пуске при U = 170 В

На рис. 3.15 приведено сравнение кривых изменения тока во времени, полученные экспериментальным и расчетным путем. Полученные результаты говорят о достаточной для инженерных расчетов точности расчета.

3.4.2. Полевая динамическая модель неявнополюсного ДПТ

В качестве объекта для апробации ПДМ КМ с параллельным возбуждением был выбран ДПТ серии 4П, параметры которого приведены в главе 2.



Рис. 3.16. Результаты обучения МПД ДПТ: а) $L_{ff}(i_f, i_a)$; б) $L_{fa}(i_f, i_a)$; в) $L_{aa}(i_f, i_a)$; г) $L_{af}(i_f, i_a)$; д) $C_a(i_f, i_a)$; е) $M(i_f, i_a)$



Рис. 3.17. Результаты пуска ДПТ, полученные на упрощенной модели (пунктир) и полевой динамической модели УКД (сплошная линия): a) i_f(t); б) i_a(t) ; в) n(t)

С помощью параметрического генератора для него была построена конечно-элементная модель магнитного поля машины 4П80 рис. 1.2. Для обучения ПДМ ДПТ организована серия расчетов магнитного поля при - $i_{fmax} \le i_{ft} \le +i_{fmax}$, $0 \le i_{at} \le +i_{amax}$ и $0 \le \alpha_t \le \alpha_z$. По результатам расчетов были построены матрицы $L_{fft}(i_{ft},i_{at},\alpha)$, $L_{fat}(i_{ft},i_{at},\alpha)$, $L_{aat}(i_{ft},i_{at},\alpha)$, $L_{aft}(i_{ft},i_{at},\alpha)$, $C_{at}(i_{ft},i_{at},\alpha)$ и $M_t(i_{ft},i_{at},\alpha)$. С учетом скоса пазов из них была устранена зависимость от α . Получили зависимости $L_{fft}(i_{ft},i_{at})$, $L_{fat}(i_{ft},i_{at})$, $L_{aat}(i_{ft},i_{at})$, $L_{aft}(i_{ft},i_{at})$, и $M_t(i_{ft},i_{at})$, представленных на рис. 3.16. Результаты моделирования пуска ДПТ представлены на рис. 3.17. Анализ показывает наличие эффектов, которые невозможно учесть на упрощенной модели, например, прогиб в кривой $i_f(t)$.

3.4.3. Полевая динамическая модель ДПТ нетиповой конструкции

Одним из основных приложений ПДМ КМ является использование в качестве подсистемы расширенного поверочного расчета САПР КМ, в которой реализована структурно-параметрическая оптимизационная модель, описанная в главе 2. Данная модель приводит к вариантам конструкции, для которых не существует апробированных методик поверочного расчета. Поэтому главное требование, предъявляемое к разрабатываемая в данной диссертации ПДМ КМ, состоит в возможности имитации работы коллекторных машин произвольной конструкции. Для проверки данной возможности смоделируем пуск ДПТ, конструкция которого защищена свидетельством на полезную модель [95], КЭМ которой приведена на рис. 3.18.



Рис. 3.18. Конечно-элементная модель ДПТ нетиповой конструкции

Данная конструкция получена путем модифицирования статора неявнополюсной КМ с сохранением малой величины воздушного зазора, что позволяет существенно уменьшить ОВ. В данной конструкции полностью удаляется КО, а влияние размагничивающего действия поперечной реакции якоря снижается за счет немагнитны вставок по осям главных полюсов. Как отмечено в [94] такая конструкция способна обеспечить до 30% экономии меди, до 35% экономии стали, до 20% снижения высоты оси вращения. Расчет рабочих характеристик машины (в установившемся режиме работы) дает удовлетворительные результаты, что, собственно, и позволило получить свидетельство на полезную модель. Однако возникают сомнения в плане динамических характеристик данной машины. Поэтому было решено смоделировать ее работу с использованием ПДМ КМ.



Рис. 3.19. Кривые разгона ДПТ рис. 3.18; масштаб по току OB $m_{if} = 0,1$ А/ед; масштаб по току OЯ $m_{ia} = 1$ А/ед; масштаб частоте вращения $m_{\omega} = 10$ рад/с/ед

Для этого была использована ПДМ КМ, приведенная на рис. 3.5 и обученная на модели рис. 3.18. На рис. 3.19 приведены кривые разгона данной машины без нагрузки, полученные при численной имитации эксперимента [35, 84]. Из рисунка видно, что в процессе пуска частота вращения за доли секунды возрастает от 0 до 700 рад/с, что почти вдвое превышает номинальное значение $\omega_{\rm H} = 314$ рад/с. Ток якоря при этом уменьшается очень медленно. Это объясняется наличием резко выраженного эффекта опрокидывания поля при пусковом токе ОЯ, приводящему к насыщению стали и существенному снижению величины магнитного потока. Затем по мере уменьшения тока ОЯ опрокидывание поля также резко пропадает вследствие нелинейности магнитных характеристик стали и частота вращения стабилизируется на номинальной отметке. Влияние взаимной индуктивности приводит к характерному провалу в кривой тока ОВ. Моделирование пуска машины под нагрузкой вообще привело к тому, что машина «пошла в разнос».

Полученные результаты говорят о том, что работа машины предложенной конструкции при данной геометрии расчетной области является неустойчивой при резких бросках тока якоря. Причем в установившихся режимах машина работает нормально. Несмотря на это конструкцию машины необходимо признать неудачной. Это вовсе не означает, что данное конструктивное решение, на которое получено свидетельство, должно быть отвергнуто. Оно должно быть правильно просчитано. Например, увеличение зазора в ущерб экономии материалов, или сохранение компенсационной обмотки и т.п. КМ является нелинейным объектом. Поэтому также как изначально невозможно было предсказать плохую динамику в предложенной конструкции, также нельзя отрицать, что при определенной параметрической доработке данное конструктивное решение может оказаться оптимальным. Именно для этих целей в САПР КМ была разработана ПДМ КМ, которая используется не только на стадии поверочного расчета, но и на стадии НИОКР, а также при моделировании КМ в составе электроприводов.

88

Выводы по третьей главе

1. Проблему поиска оптимальной конструкции электрической машины, в частности КМ, невозможно решить без анализа динамических режимов работы спроектированного устройства еще на стадии расчета.

2. В настоящее время одним из наиболее востребованных методов моделирования динамических режимов электрических машин и электроприводов является метод имитационного моделирования с использованием цепных моделей, реализуемых современными имитационными пакетами. Одним из наиболее развитых и популярных пакетов подобного рода является пакет MatLab Simulink.

3. Для анализа динамики КМ нетиповой конструкции цепных моделей недостаточно – требуются динамические модели, построенные на основе теории поля, которые позволяют учесть влияние особенностей конструкции машины на ее динамические характеристики. Учитывая необходимость использования данных моделей в системах имитации работы электроприводов, наиболее перспективными можно считать динамические модели, построенные на основе предварительной серии полевых расчетов, разработанные в [94].

4. Ввиду актуальности проблемы моделирования динамики КМ нетиповой конструкции была поставлена и решена задача разработки методики построения быстродействующих полевых динамических моделей КМ, обученных на предварительных сериях полевых расчетов, адаптированная к реализации в современных имитационных пакетах MatLab Simulink, SciLab Xcos и т.п. В отличие от аналогичных работ, например [94], разработанная в данной диссертации методика позволяет не ограничиваться моделированием динамики единичной машины, а в полной мере использовать преимущества современных имитационных пакетов при моделировании динамики машин, работающих в составе электроприводов.

5. Разработанная методика поддержана разработкой соответствующего программного обеспечения, позволяющего без предварительной настройки

89

осуществлять обучение модели, формирование и исследование полевой динамической модели в среде MatLab Simulink и SciLab Xcos. Данное программное обеспечение реализовано на базе популярного табличного процессора MSOffice, что позволяет объединить все разработанные подсистемы в рамках единой проектной среды, доступной производителям электрических машин из сферы малого и среднего бизнеса, что соответствует современным Российским тенденциям импортозамещения.

6. Адекватность разработанной модели в случае УКД была проверена на экспериментальной установке. Так как при моделировании сложно учесть все тонкости эксперимента, то мы считаем, что полученные результаты говорят о достаточной для инженерных расчетов точности модели.

7. Апробация моделей существующих КМ подтверждает эффективность использования полевой динамической модели, позволяющей в реальном времени исследовать различные режимы работы спроектированных устройств. Особенно интерес в этом плане представляют выявленная в ходе анализа полученных результатов чувствительность полевых динамических моделей к особенностям конструкции электрических машин. В частности, подтверждено влияние на кривую изменения тока возбуждения явления поперечной реакции якоря (см. рис. 3.17,а) и известное из теории искажение кривой переменного тока УКД нелинейностью кривой намагничивания стали (см. рис. 3.12). В случае УКД обнаружено существенное отличие динамических характеристик, полученных на упрощенных моделях и полевой динамической модели, что объясняется неточностью расчета электромагнитного момента в инженерной модели, не рассчитанной на особенности конструкции динанного УКД.

8. Актуальность разработанной методики моделирования динамики КМ особенно наглядно демонстрируется при исследовании машин нетиповой конструкции, например, см. рис. 3.18 – 3.19. Подобные результаты позволяют отсеять неудачны решения уже на стадии проектирования.

4. Разработка методики анализа и синтеза проектных решений в САПР коллекторных машин

4.1. Основные положения методики анализа и синтеза проектных решений в САПР КМ и структура проектноисследовательской среды в составе САПР КМ

При разработке методики анализа и синтеза проектных решений в САПР КМ и структуры проектно-исследовательской среды необходимо учесть следующие положения:

 возможность применения методики к расчету и численному исследованию КМ произвольной конструкции;

- совмещение традиционных инженерных методик с элементами сложных наукоемких САЕ-систем;

- использование конечно-элементной модели магнитного поля;

- возможность оптимизации конструкции машины;

- придание полевым моделям признаков обучаемости;

- учет экономических и динамических показателей проектируемой КМ;

- применение наукоемких технологий, присущих тяжеловесным САПР.

В условиях производства любое исследование, как правило, инициировано заказом на изготовление определенной серии или штучного образца продукции. Требование к данной продукции формулирует заказчик. При этом могут выдвигаться специфические требования, предполагающие принятие проектных решений в условиях отсутствия на предприятии соответствующих расчетных методик. Именно в таких случаях наиболее оправдано вместо традиционных методик инженерного расчета использовать методику, построенную на программируемых полевых моделях, разработанных в данной диссертации. Методика анализа и синтеза КМ в этом случае представляется следующей последовательностью операций.

1. Выбор или расчет аналога.

Аналог – это машина типовой конструкции, наиболее близко удовлетворяющая по требованиям технического задания. Аналог обычно выбирается из соответствующей базы данных уже спроектированных машин, имеющейся практически на любом электромашиностроительном предприятии, либо заново рассчитается по традиционной инженерной методике. В последнем случае для более точного расчета аналога рекомендуется воспользоваться одной из существующих методик проектирования КМ, например [7, 18, 43, 46, 60, 102]. Для этого в состав разрабатываемой САПР КМ включены модули расчета УКД и МПТ явнополюсной и неявнополюсной конструкции, разработанные в ИГЭУ [29, 61, 93, 96, 105] (рис. 4.1). Аналог также может быть выбран по справочнику и рассчитан по методике, приведенной в 3.3.



Рис. 4.1. Модули расчета КМ разных конструкций в MathCad и Excel

2. Параметрическая генерация конечно-элементной модели машины, выбранной в качестве аналога и исследование вариантов изменения конструкции машины.

Конечно-элементная модель аналога строится с помощью разработанного в данной диссертации ПГ КЭМ КМ. Исследование вариантов изменения конструкции аналога выполняется путем выбора соответствующих параметров ПГ КЭМ КМ, осуществляющих деформацию расчетной области КМ, а также добавление или удаление разных технологических элементов в конструкцию статора. При необходимости база технологических элементов легко расширяется, однако для этого требуется переработка программного кода ПГ КЭМ КМ.

В качестве варианта методики исследований, предлагаемой в данной диссертации, рекомендуется оставить без изменений якорь спроектированной традиционной машины с последующей реконструкцией статора, учитывающей особенности неподвижного в пространстве магнитного потока. Особо следует обратить внимание на формирование обмоток статора.

Так, при заданном напряжении питания U_f , удельном сопротивлении материала проводника ρ_f и средней длине витка l_f количество витков OB однозначно связано с плотностью тока j_f и определяется по формуле

$$W_{f} = \frac{U_{f}}{\rho j_{f} l_{f}}.$$
(4.1)

Учитывая, что в случае сосредоточенной обмотки величина намагничивающей силы (HC) ОВ определяется по формуле

$$\mathbf{F}_{\mathrm{f}} = \mathbf{j}_{\mathrm{f}} \mathbf{q}_{\mathrm{f}} \mathbf{W}_{\mathrm{f}}, \tag{4.2}$$

величину данной HC можно изменять, варьируя сечение проводника q_f.

Данный метод варьирования величины НС ОВ используется и для распределенной ОВ. Однако здесь справедливо отношение

$$\sum_{k=1}^{Ns_{f}} W_{fk} l_{fk} = \frac{U_{f}}{\rho j_{f}},$$
(4.3)

где Ns_f – количество секций OB; W_{fk} , l_{fk} – соответственно число витков и средняя длина витка k-й секции.

Величина НС ОВ итерационно уточняется путем варьирования величины q_f и номинального тока ОЯ I_a (с учетом вклада МО, по которой протекает ток I_a) исходя из требования обеспечения номинальной частоты вращения $\omega_{\rm H}$ при номинальном электромагнитном моменте, величина которого рассчитывается по результатам конечно-элементного расчета магнитного поля по формуле

$$\mathbf{M} = \frac{1}{2 \cdot \mathbf{R}} \sum_{k=1}^{N_{Ak}} \begin{bmatrix} \left(\mathbf{X}_{k} \cdot \mathbf{H}_{yk} - \mathbf{Y}_{k} \cdot \mathbf{H}_{xk} \right) \left(\mathbf{X}_{k} \cdot \mathbf{B}_{xk} + \mathbf{Y}_{k} \cdot \mathbf{B}_{yk} \right) + \\ + \left(\mathbf{X}_{k} \cdot \mathbf{B}_{yk} - \mathbf{Y}_{k} \cdot \mathbf{B}_{xk} \right) \left(\mathbf{X}_{k} \cdot \mathbf{B}_{xk} + \mathbf{Y}_{k} \cdot \mathbf{B}_{yk} \right) \end{bmatrix} \Delta \mathbf{L}_{k} \cdot \mathbf{L}_{\delta} , \quad (4.4)$$

где R – средний радиус зазора; $N_{\Delta k}$ – количество элементов зазора, пересекаемых срединным цилиндрическим сечением; X_k , Y_k , ΔL_k – координаты центра и длина отрезка сечения зазора в k-м элементе; B_{xk} , B_{yk} , H_{xk} , H_{yk} – координаты вектора магнитной индукции и напряженности магнитного поля в k-м элементе; L_{δ} – расчетная длина зазора машины в направлении, перпендикулярном модели [94].

В свою очередь частота вращения якоря вычисляется по формуле

$$\omega = \frac{U_a - I_a R_a - \Delta U_{\mu}}{C \cdot \Phi} = \frac{2\pi a}{p N_a \Phi} \left(U_a - I_a R_a - \Delta U_{\mu} \right), \qquad (4.5)$$

или по уточненной формуле

$$\omega = \frac{U_a - I_a R_a - \Delta U_{\mu}}{\frac{\partial \Psi_a}{\partial \alpha}\Big|_{\mu}},$$
(4.6)

где U_a – напряжение на ОЯ; I_a – номинальный ток ОЯ; R_a – суммарное сопротивление в цепи ОЯ; $\Delta U_{\mu\mu}$ – падение напряжения в щеточном контакте; Φ – магнитный поток; а – число пар параллельных ветвей ОЯ; р – число пар полосов КМ; N_a – число активных проводников ОЯ; $\frac{\partial \Psi_{a}}{\partial \alpha}\Big|_{\mu}$ – частная произ-

водная от потокосцепления ОЯ по углу поворота в номинальном режиме работы КМ.

Сечение провода ОЯ, СО, КО и ОДП также выбирается исходя из заданной плотности тока при номинальном токе якоря. Количество витков этих обмоток выбирается исходя из возможности укладки этих витков выделенные для них пазы при заданной плотности полного тока в пазах, величина которого косвенно учитывает коэффициент заполнения паза.

Сопротивления к-й обмотки вычисляется по формуле

$$R_{k} = \frac{1}{a_{k}^{2}} \sum_{i=1}^{N_{s_{k}}} \sum_{j=1}^{W_{s_{k}i}} \left(L_{\delta} + 2 \cdot B_{ki} + R_{ki} \cdot \alpha_{ki} \right) \frac{2\rho}{S_{np}}, \qquad (4.7)$$

где a_k – количество параллельных ветвей k-й обмотки; N_{sk} – количество секций в параллельной ветви k-й обмотки; W_{ski} – количество витков в i-й секции k-й обмотки; L_{δ} – длина якоря, м; B_{ki} , R_{ki} , α_{ki} – вылет лобовой части, средний радиус и угол между активными сторонами i-й секции k-й обмотки, м; ρ , S_{np} – удельное сопротивление и сечение проводника k-й обмотки.

CreateModel_7.xlsm - Microsoft Excel														
		Главная Вставка Разметка страницы Формулы	Данные	Рецен		🕜 _ 🗖 X								
Bc	$\begin{array}{c c} & & & \\ & & & \\$					О словное форм орматировати тили ячеек т	Ц матирование т ь как таблицу т	Вставить З [™] Удалить Щ Формат У	Σ · · · ·	Сортировк и фильтр	а Найтии выделить			
Буф	ep 06	шрифт выравнивание	0	число	19	Стил	и	ячеики		Редактиро	вание МАТLAB			
	_										×			
	AB	C	D	E	F	G	Н		J	K	L			
	Генерация и исследование КЭ-модели электрической машины													
1	01	терыть окно закрыть окно теометрия сохранит	Pac	чег дин	амика	Нормальный режим с триангуляцией			•					
135		Результаты расчета				Pa	сход материал	ТОВ						
136	No	Название	Ел Обозн. Знач.			Название	Исходник	Расчет	Экон	омия				
137	2	Магнитный поток	B6	Φ	0,001474	Медь	2,128	1,3861981	%	34,9				
138	3	Индукция в зоне коммутации	Тл	Взк	-0,01547	Сталь 10,152		6,154507	%	39,4				
139	4	Электромагнитный момент	Нм	М	2,353659		Параме	тры обмото	к					
140	5	эдс оя	В	Ea	199,8613	Название	W	Длина	Сопр.	Потери	Плотность тока			
141	6	Частота вращения	1/c	n	2935	OB	4000	1242,3228	1,60E+03	30	7,261866731			
142	7	Время расчета	мм	đt	0,96875	со	0	0	0,00E+00	0	7,003546099			
143	1	-й паз	J1	1658139		одп	0	0	0,00E+00	0	7,003546099			
144	2	-й паз	J2	1575774		КО	180	47,384905	2,05E+00	32	7,003546099			
145	3	-й паз	J3	1839463		ОЯ	693	209,83619	2,54E+00	40	7,852882704			
146	4	-й паз	J4	1922014		Na =	1386							
147	5	-и паз	12	1902954		C=	441,18							
140	-					1111 -	2,307							
150						Номинальный режим со скосом								
151						Nal =	3	-	AI	Ф, Вб	М, Нм			
152						If =	0,137249281	Α	-0,09973	0,00117	2,044702206			
153						la =	3,95	А	0	0,00147	2,353653966			
154						E =	199,861302	В	0,099733	0,00168	2,794136422			
155	_					M =	2,397497531	HM						
156			-			Φ=	21/ 2197227	1/c						
158						n =	3000.567785	об/мин						
14	• •	ЭМ Оптимизация ДПТ УКД Модель Pf Pa	Pk / F	i / Mem /	Варианты	Приложен	ие / СМ / КЭМ				►			
Гот	080	1							₩ 🛛 🖽	100% 😑	. +			

Рис. 4.2. Инструментарий поддержки методики формирования обмоток

Описанная методика формирования обмоток статора опирается на опыт проектирования и интуицию проектировщика. В помощь проектировщику дается инструментарий, позволяющий автоматически подбирать с использованием методов нелинейного программирования сечение проводника OB q_f значение номинального тока OЯ I_a , обеспечивающих номинальную частоту вращения $\omega_{\rm H}$ при номинальном электромагнитном моменте M (рис. 4.2). Расчет осуществляется с учетом наличия скоса пазов в ходе серии расчетов магнитного поля с использованием библиотеки EMLib.

3. Структурно-параметрическая оптимизация КМ.

На данном этапе осуществляется синтез конструкции машины. Поиск осуществляется с использованием генетических алгоритмов с обращением на каждом шаге поиска к ПГ КЭМ МП КМ. Более подробно методика структурно-параметрического синтеза КМ описана в п. 2.3.

4. Поверочный расчет КМ.

Методика поверочного расчета основана на серии численных расчетов магнитного поля при номинальном токе OB и значениях тока якоря, варьируемых в пределе 0 – 2I_н. По результатом данной серии по (4.4) рассчитываются величина электромагнитный момента М. Величина основного магнитного потока рассчитывается по формуле

$$\Phi = \frac{1}{2p} \sum_{i=1}^{2p} \left(L_{\delta} \cdot \mathbf{A}_{i} \cdot \begin{cases} 1 \,\forall i = 2 \cdot \lfloor i/2 \rfloor \\ -1 \,\forall i \neq 2 \cdot \lfloor i/2 \rfloor \end{cases} \right), \tag{4.8}$$

где L_{δ} – длина якоря; A_i – величина векторного магнитного потенциала в точках воздушного зазора, лежащих на геометрической нейтрали; $\lfloor i/2 \rfloor$ – функция выделения целой части вещественного числа i/2.

Величина
$$\frac{\partial \Psi_a}{\partial \alpha} \Big|_{_{\rm H}} \approx \frac{\Delta \Psi_a}{\Delta \alpha} \Big|_{_{\rm H}}$$
 вычисляется путем сдвига якоря относительно

исходного положения с неизменными значениями магнитных сопротивлений во всех элементах конечно-элементной сетки. Значение потокосцепления ОЯ Ψ_a вычисляется по формуле [94]

$$\Psi_{a} = \frac{L_{\delta}}{3} \sum_{q=1}^{2a} \sum_{k=1}^{Ns_{q}} \left(\frac{\sum_{i=1}^{N_{qk1}} \sum_{j=1}^{3} S_{\Delta i} A_{ij}}{\sum_{i=1}^{N_{qk1}} S_{\Delta i}} - \frac{\sum_{i=1}^{N_{qk2}} \sum_{j=1}^{3} S_{\Delta i} A_{ij}}{\sum_{i=1}^{N_{qk2}} S_{\Delta i}} \right),$$
(4.9)

здесь N_{qk1} , N_{qk2} – число элементов конечно-элементной сетки, покрывающих сечения соответственно левой и правой сторон секций k-й секции q-й параллельной ветви OЯ; $S_{\Delta i}$ – площадь i-го элемента; A_{ij} – значения векторного магнитного в узлах i-го элемента.

Частота вращения якоря рассчитывается по (4.1.5) или (4.6). Результатом расчета является механическая характеристика рис. 4.3.

CreateModel_7.xlsm - Microsoft Excel Работа с диаграммами																	
Главная Вставка Разметка страницы Формулы Данные Рецензирование Вид Разработчик Конструктор Макет Формат 🎯 – 📼 🗙																	
Саlibri (Осно т 10 т = = = = = = Общий т Д = Вставить т Σ τ Д = Вставить т Д = Вставить т Д = Я Д =																	
Вст	авити	° 🦪 👘		· A ·	幸幸 參 ^{★,0} ↔0 ^{Стили} Формат → Q →							Со	Сортировка Найтии и фильтр т выделить т				
Буфе	0 0 G N	іена 🖻	Шри	ифт	🛿 Выравнивание 🖾 Число 🖻 Ячейки							P	Редактирование MATLAB				
Диаграмма 4 🔻 🔿 🧃 📠													¥				
	Н	1	J	К	L	M	N	0		Р	Q	R	S	Т	U	-	
37		Статические характеристики			N	=	10	Расчет	с	C = 441							
38					Мном	=	2,38732	32		нн =	3007,34						
39		N	la, A	E,B	М, Нм		Ф, Вб	C	w, 1/c		n, об/мин		1	2	3		
40		1	0,01	218	0,12053		0,00114	-72,4816	431,59		4121,4		0,11008	0,08302	0,16849		
41		2	<mark>0,</mark> 8778	214	0,55862		0,00122	-1284,91	3	96,589	3787,15		0,53132	0,50862	0,63592		
42		3	1,7556	209,9	1,04865		0,0013	-1290,76	3	66,893	3503,57		0,96099	0,98895	1,19601		
43		4	2,6333	205,9	1,57368		0,00136	-1228,24	3	42,573	3271,33		1,39353	1,51133	1,81618		
44		5	3,5111	201,9	2,12024		0,00142	-1167,95	3	22,729	3081,83		1,8277	2,06636	2,46665		
45		6	4,3889	197,8	2,67629		0,00146	-1120,78	3	06,488	2926,74		2,26117	2,64628	3,12142		
46		7	5,2667	193,8	3,23276		0,0015	-1086,7	2	293,036 2798			2,6917	3,24272	3,76386		
47		8	6,1444	189,8	3,78381		0,00153	-1063,89		281,83 2691,2			3,11891	3,84494	4,38757	I	
48		9	7,0222	185,8	4,32594		0,00155	-1049,71		272,27	2599,99		3,54237	4,44033	4,99511	I	
49		10	7,9	181,7	4,85645		0,00156	-1042,23	2	63,906	2520,12		3,96094	5 <mark>,0218</mark> 5	5,58656	I	
50		4500													=		
51		4000											Магнитный поток				
52													1	2	3		
53		200											0,00114	0,00115	0,00114		
54		3000											0,00115	0,00123	0,00129		
55		250								-	n, об/мин		0,00116	0,00131	0,00143		
56		1500 1000 500				t					Mn		0,00116	0,00138	0,00154		
57	_					\uparrow				_			0,00117	0,00144	0,00164		
58						+							0,00117	0,0015	0,00172		
59						+							0,00117	0,00155	0,00177		
60			0 +						_				0,00117	0,00159	0,00182		
61	1 0 1				2 3							0,00117	0,00162	0,00185			
62										0,00187	¥						
H ← → H ЭМ / Оптимизация ДПТ / УКД / Модель / Pf / Pa / Pk / Fi / Mem / Варианты / Прилохі ↓ I																	
Готов	50					Ср	еднее: 1,245370	рэч количес	TBO:	40 Сум	Ma: 48,56968506			» 🕘	• •	.::	

Рис. 4.3. Инструментарий расчета механической характеристики КМ

Поверочный расчет можно считать успешным, если при номинальном моменте на механической характеристике фиксируется номинальная частота вращения. Если результат не достигнут, следует вернуться на этап генерации конечно-элементной модели и перераспределить обмотки статора. В некоторых случаях требуется изменение конфигурации магнитопровоа статора, например, изменение числа и размеров пазов статора. При распределении витков обмоток статора следует придерживаться заданной плотности тока в проводниках обмоток статора, а также плотности полного тока в пазах статора. В противном случае требуется проведение уточненного теплового расчета машины, например, с использованием современных САЕ-систем или уточненных моделей тепловых цепей.

В результате поверочного расчета также рассчитываются масса обмоточного провода и масса стали, требуемых для изготовления КМ.

5. Обучение динамической модели КМ на серии полевых расчетов.

Методика обучения динамической модели КМ описана в 3.2.

6. Исследование динамической модели КМ.

Полевая динамическая модель КМ, функционирующая в среде MatLab Simulink, описана в 3.1. Методика исследований соответствует поставленным задачам и состоит, как правило, в построении цепной модели электропривода, в который интегрирована исследуемая КМ, и имитации различных режимов работы машины в составе электропривода.

7. Анализ результатов и корректировка конструкции КМ

Структура проектно-исследовательской среды, обеспечивающей реализацию перечисленных операций, представлена на рис. 4.4.



Рис. 4.4. Структура проектно-исследовательской среды в составе САПР КМ

Данная структура включает в себя следующий набор подсистем:

1. Подсистема предварительного расчета аналога.

Данная подсистема строится на базе следующих модулей:

≻ база данных аналогов;

- > подсистема упрощенного расчета по паспортным данным;
- > набор моделей инженерного расчета КМ традиционной конструкции.
- 2. Подсистема параметрический генерации и исследования КЭ-модели.

Основным модулем данной подсистемы является параметрический генератор конечно-элементной модели магнитного поля КМ, реализованный в виде рабочей книги Exce с набором макросов на языке VBA, обращающихся к соответствующим функциям библиотеки EMLib.

3. Подсистема структурно-параметрической оптимизации КМ

99

Внешний вид рабочего окна данной подсистемы представлен на рис. 2.22. Также в п. 2.3 приведено описание основных положений, на основании которых строится работа с данной подсистемой.

4. Подсистема поверочного расчета КМ

5. Подсистема обучения динамической модели КМ

Результат обучения фиксируется на нескольких листах рабочей книги Excel и передается в MatLab, где полученные матрицы аппроксимируются двух- или трехмерными сплайнами (см. рис. 3.16).

6. Подсистема исследования динамической модели КМ

Полевая динамическая модель КМ, функционирующая в среде MatLab Simulink, описана в п. 3.1. Подсистема исследования динамической модели КМ позволяет сравнить результаты полученные с использованием как полевой динамической модели, так и упрощенной модели, построенной для аналога традиционной конструкции.

7. Подсистема анализа результатов и корректировки конструкции КМ

Отдельного модуля для данной подсистемы не существует, и анализ результатов осуществляется с использованием всего описанного функционала. По результатам анализа принимаются решения о корректировке конструкции КМ, после чего цикл исследований повторяется (за исключением первого этапа выбора аналога).

4.2. Апробация методики анализа и синтеза проектных решений в САПР КМ

В качестве аналога была выбрана машина серии 4П80. В п. 2.3 статор данной машины был оптимизирован с использованием разработанной методики. При этом спинка статора была усечена, пазы статора сделаны неравномерными, обмотки статора перераспределены с учетом требования равенства плотности полного тока паза значениям, соответствующим исходному варианту (см. рис. 2.23). Анализ данного варианта позволяет сделать вывод о возможности получения еще большей экономии стали за счет снижения высоты оси вращения. Для этого перейдем к явнополюсной конструкции, предлагаемой в [95] (см. рис. 3.18).



Рис. 4.5. Магнитное поле в номинальном режиме КМ, полученной в результате структурно-параметрической оптимизации

Однако приведенные в 3.4 результаты исследования говорят, что данная конструкция не обеспечивает удовлетворительных динамических характеристик ввиду опрокидывания магнитного поля в момент пуска. Кроме того в процессе пуска в зоне коммутации возникает недопустимо большая магнитная индукция, что приводит к значительному искрению на коллекторе. Все это говорит о необходимости использования в данной конструкции дополнительных полюсов и компенсационной обмотки.

В результате был предложен вариант конструкции статора, представленный на рис. 4.5. Для данного варианта была сформулирована задача структурно-параметрической оптимизации. Целевая функция имеет вид

$$\begin{split} F\left(\vec{X}\right) &= h_{c}^{2}L_{\delta}\gamma_{Fe} + \frac{C_{Cu}}{C_{Fe}}\sum_{i=1}^{N_{w}}L_{i}q_{i}\gamma_{Cu} + \\ &+ \begin{cases} k_{\Phi \max}\left(\Phi - \Phi_{\max}\right) \forall \Phi > \Phi_{\max}, \\ k_{\Phi \min}\left(\Phi_{\min} - \Phi\right) \forall \Phi < \Phi_{\min}, + \\ 0 \forall \Phi_{\min} < \Phi < \Phi_{\max}, \end{cases} \\ &+ \begin{cases} k_{B\max}\left(B - B_{\max}\right) \forall B > B_{\max}, \\ k_{B\min}\left(B_{\min} - B\right) \forall B < B_{\min}, + \\ 0 \forall B_{\min} < B < B_{\max}, \end{cases} \end{split}$$
(4.10)
$$&+ \begin{cases} k_{Bkz\max}\left(B_{kz} - B_{kz\max}\right) \forall B_{kz} > B_{\max}, \\ k_{Bkz\min}\left(B_{kz\min} - B_{kz}\right) \forall B_{kz} > B_{\max}, \end{cases} \\ &+ \begin{cases} k_{Bkz\min}\left(B_{kz\min} - B_{kz}\right) \forall B_{kz} > B_{\max}, \\ 0 \forall B_{kz\min} < B_{kz} < B_{\min}, \\ 0 \forall B_{kz\min} < B_{kz} < B_{\max}, \end{cases} \end{split}$$

где h_c – расстояние от оси машины до сечения спинки статора; γ_{Fe} , γ_{Cu} – соответственно плотность электротехнической стали и меди обмоток; C_{Cu} , C_{Fe} – стоимость медного провода и электротехнической стали; N_w – количество обмоток статора; L_i , q_i – суммарная длина провода и сечение провода i-й обмотки статора; Φ – величина магнитного потока; B – индукция в зоне коммутации в номинальном режиме; B_{kz} – индукция в зоне коммутации в режиме K3; $\Phi_{min} = 0,99\Phi_H$, $\Phi_{max} = 1,1\Phi_H$, $B_{min} = 0$, $B_{max} = 0,05$ Тл, $B_{kz min} = -0,04$ Тл, $B_{kzmax} = 0,05$ Тл – функциональные ограничения по магнитному потоку и индукции в зоне коммутации; $k_{\Phi min}$, $k_{\Phi max}$, k_{Bmin} , k_{Bmax} , k_{Bmax} , k_{Bkzmax} – весовые коэффициенты.

В отличие от (2.12) поиск по данной функции цели приводит к решению с минимальной стоимостью активных материалов. Штрафные функции не позволяют КМ выйти за пределы заданных значений по магнитному потоку и условиям коммутации как в номинальном режиме, так и в режиме пуска КМ.

В качестве допущений принималось:

- якорь машины не меняется по сравнению с исходным вариантом машины;
- машина имеет явнополюсную конструкцию с межполюсными окнами, полностью заполненными активными сторонами обмоток ШОВ и ОДП, расположенных в два слоя;
- на полюсной дуге статора выполнены неравномерные пазы, в которых в два слоя располагаются обмотки КО и ШОВ;
- 4) секции обмоток статора являются концентрическими;
- сечение проводов КО и ШОВ принималось равным соответствующим сечениям провода в исходном варианте, с последующим пересчетом сечения и числа витков ШОВ по методике (4.1) – (4.3);
- плотности тока в пазах равны средней плотности тока в пазах статора исходного варианта.

Список варьируемых параметров включает в себя:

- 1) величина зазора;
- 2) внешний диаметр статора;
- 3) расстояние от оси машины до сечения спинки статора;
- 4) наличие или отсутствие прорези на оси статора
- 5) ширина прорези на оси статора;
- 6) количество пазов статора;
- 7) количество невырубленных пазов статора на оси статора;
- 8) количество невырубленных пазов статора на нейтрали;
- 9) ширина зубца статора;
- 10) максимальная высота паза статора;
- 11) относительные плотности тока в пазах статора на половине полюсного деления.

Относительная плотность тока в p-м пазу изменялась в диапазоне $0 \le j_p^* \le 1$, (4.11) причем 0 соответствует варианту, когда паз полностью занят ШОВ, а 1 – варианту, когда паз полностью занят КО или ОДП. При промежуточных значениях j_p^* количество витков ШОВ в верхнем слое р-го паза равно

$$N_{fp} = j_p^* \cdot N_{fp\,max}, \qquad (4.12)$$

а количество витков КО или ОДП в нижнем слое р-го паза равно

$$N_{fk} = \left(1 - j_p^*\right) \cdot N_{kpmax}, \qquad (4.13)$$

где N_{fpmax}, N_{kpmax} – соответственно максимально возможное количество витков ШОВ и КО, которое размещается в p-м пазу.

Решение оптимизационной задачи с использованием генетических алгоритмов позволило получить оптимальный с точки зрения экономии материалов параметры, а именно:

1. Глубина усечения спинки статора, позволяющая получить более 39,4% (в зависимости от ширины рулона стали) экономии электротехнической стали по сравнению с аналогом за счет уменьшения высоты оси вращения и более рационального раскроя (в п. 2.3 экономия стали составила 23,5% и более);

2. КО содержит всего 45 витков на полюс (в аналоге было 85 витков на полюс) и располагается в пазах статора таким образом, чтобы плотность полного тока в пазу не превышает 1,9 А/мм² (в аналоге эта величина достигала 2,28 А/мм²), что гарантирует нормальную теплоотдачу. По сравнению с вариантом аналога экономия меди в обмотках статора (без учета ОЯ) составляет 34,9%.

3. Такая КО не обеспечивает полной и совершенной компенсации реакции якоря. Однако одна катушка КО располагается в тех же крайних пазах полюсного деления, что и ОВ (в два слоя), являясь таким образом ОДП (зубец на геометрической нейтрали сохраняется, как в аналоге). Это локально улучшает условия в зоне коммутации. Данному улучшению способствует наличие прорези на пути потока реакции якоря и КО. Такая прорезь обеспечивает эффект Ш-образного дополнительного полюса, так как поток КО замыкается через воздушный зазор в пределах данного участка полюсной дуги (рис. 4.6). Как показано в [109] Ш-образные полюса способствуют экономии меди ОДП.

Рис. 4.6. Картина магнитного поля, созданного КО, демонстрирующая наличие эффекта Ш-образных полюсов

4. Наличие эффекта Ш-образного дополнительного полюса позволило обеспечить в зоне коммутации в номинальном режиме индукцию 0,015 Тл, обеспечивающую ускоренную коммутацию, не способствующую искрению на коллекторе (в варианте на рис. 3.18 [95] индукция в номинальном режиме составляла 0,02, но обеспечивая при этом запаздывающую коммутацию, способствующую искрению на коллекторе). При пуске в зоне коммутации магнитная индукция достигает значений 0,033 Тл, способствующих искрению на коллекторе, но это длилтся тысячные доли секунды, что допустимо для машин такой мощности (в варианте на рис. 3.18 при пуске в зоне коммутации достигалась индукция 0,23 Тл, что существенно осложняет коммутацию при пуске и в динамических режимах). В результате констатируем, что условия в зоне коммутации в полученном варианте конструкции машины удовлетворительные во всех режимах работы.

Рис. 4.7. Картина магнитного поля в номинальном режиме в машине без прорези

Следует отметить, что если бы в машине не было прорези, то при тех же обмоточных данных даже в номинальном режиме существенно сказывалось бы несовершенство КО. Так сравнение рис. 4.7 и 4.5 показывает, что прорезь выравнивает распределение магнитного потока в пределах полюсной дуги. При этом индукция в зоне коммутации в варианте на рис. 4.7 составляет 0,02 Тл, ухудшая при этом коммутацию.

5. Кривые пуска спроектированной машины, полученные на обученной полевой динамической модели представлены на рис. 4.8 – 4.10.

Рис. 4.8. Зависимость частоты вращения от времени при пуске КМ (сплошная линия) и аналогичной традиционной КМ, рассчитанной по упрощенной модели (пунктир)

Рис. 4.9. Зависимость тока якоря от времени при пуске КМ (сплошная линия) и аналогичной традиционной КМ, рассчитанной по упрощенной модели (пунктир)

Рис. 4.10. Зависимость электромагнитного момента от времени при пуске КМ


Рис. 4.11. Распределение магнитной индукции в зазоре в разные моменты времени при пуске КМ

В отличие от рис. 3.19 разгон здесь проходит без осложнений, что говорит об удовлетворительных динамических характеристиках спроектированной машины. Картина магнитного поля в первые моменты времени оказывается достаточно сложной (рис. 4.11). Но, благодаря наличию прорези в главных полюсах величина среднего магнитного потока на полюс всегда оказывается положительной. Причем, как показала серия расчетов магнитного поля, это не зависит от начального положения якоря.

Дополнительная информация для анализа разгона машины приведена в приложении П.2.

Выводы по четвертой главе

1. Разработанная методика анализа и синтеза КМ отличается использованием автоматически генерируемых моделей магнитного поля как на стадии поиска оптимального варианта, так и на стадии поверочного расчета, осуществляемого в форме имитационного эксперимента. Это позволяет осуществлять расчет и численное исследование КМ нетиповой конструкции. Данная методика используется как на стадии собственно расчета и оптимизации параметров электрической машины, так и на стадии предпроектных научных исследований при поиске оптимальных вариантов конструкции КМ, учитывающих особенности ее эксплуатации.

2. Разработанная расчетная подсистема САПР КМ, рассчитанная на использование предложенной методики, совмещает в себе возможности традиционных расчетных подсистем, основанных на инженерных методах расчета электрических машин, с элементами сложных наукоемких САЕ-систем, основанных на цепных и полевых расчетах.

3. Использование гибкой автономной библиотеки конечно-элементного моделирования магнитного поля в качестве ядра данной подсистемы позволяет осуществлять программным образом как генерацию конечно-элементной модели магнитного поля машин произвольной конструкции, так

и осуществлять программируемые серии численных расчетов по произвольным алгоритмам.

4. В частности, это позволило создать модуль структурнопараметрической оптимизации, позволяющий находить оптимальные варианты конструкции машины с оптимальными параметрами.

5. Использование обучаемых полевых динамических моделей КМ позволяет осуществлять поверочный расчет машины произвольной конструкции путем имитации эксперимента. При этом динамическая модель машины используется в качестве элемента модели электропривода, что позволяет исследовать ее работу с учетом особенностей эксплуатации даже в случае нетиповых вариантов ее исполнения при быстродействии, характерном для традиционных упрощенных цепных динамических моделей.

6. Система была тестирована на примере КМ нетиповой конструкции, позволяющей экономить электротехническую сталь более чем на 39%, и медный провод в обмотках статора почти на 35%. В данной конструкции были учтены особенности распределения неподвижного относительно статора магнитного поля. Динамическая модель, построенная для данной машины, показала, что машина ведет себя удовлетворительно в переходных режимах, даже при наличии больших бросков тока.

7. Расчетная подсистема САПР КМ реализована на базе компьютерных технологий и программных средств, доступных для предприятий среднего и малого бизнеса, в частности, для ремонтных мастерских. При этом в ней реализованы наукоемкие модели, характерные для тяжеловесных САПР и даже превосходящих их в плане гибкости настройки на конкретного производителя и конкретную производственную задачу.

Заключение

Благодаря своим динамическим и тяговым свойства коллекторные машины до сих пор остаются одними из наиболее востребованных электрических машин, особенно в бытовой технике и в транспорте. Особенно интересны машины нетиповой конструкции, в которых учтены достоинства неподвижного относительно статора магнитного полтока. Этим объясняется необходимость разработки новых подходов к созданию САПР КМ, доступных широкому кругу производителей и ремонтных организаций.

В данной диссертация была поставлена и достигнута цель, заключающаяся в повышении эффективности автоматизированного проектирования коллекторных машин. Данная цель достигнута путем разработки и использования математических моделей, построенных на основе комбинации полевых и цепных моделей, в задачах анализа и синтеза проектных решений. Синтез КМ осуществляется путем решения задачи структурно-параметрической оптимизации с использованием параметрического генератора моделей магнитного поля. Анализ проектных решений осуществляется путем исследования полевой динамической модели спроектированной КМ с использованием современных имитационных пакетов.

В диссертации решены поставленные задачи:

1. Разработан расширяемый параметрический генератор конечноэлементных моделей магнитного поля КМ, позволяющий автоматизировать построение полевых моделей КМ типовой и нетиповой конструкции в рамках изначально заложенных в него степеней свободы.

2. Разработана оптимизационная модель КМ, реализуемая с использованием генетических алгоритмов, в которой функция цели рассчитывается на основе результатов расчета магнитного поля на автоматически генерируемой на каждом шаге поиска полевой модели. Данная оптимизационная модель способна решать задачи структурно-параметрического синтеза КМ.

3. Разработана полевая динамическая модель КМ, сопоставимая по скорости вычислений с традиционными цепными моделями, но позволяющая

112

учесть влияние на работу машины нетиповых особенностей ее магнитной системы аналогично полевым моделям. Данная модель способна интегрироваться в современные имитационные пакеты в качестве компонента моделей систем автоматизированного электропривода.

4. Разработана структура проектно-исследовательской среды, позволяющей осуществлять управления приложениями и моделями САПР КМ. Создан программный комплекс, представляющий собой инструментальную проектно-исследовательскую среду, в которой интегрированы разработанные модели и элементы управления данными моделями. Данный комплекс представляет собой вариант «облегченной», а значит, и относительно дешевой САПР, позволяющей в то же время решать практически все задачи, проектно-исследовательского характера, характерные для «тяжеловесных» САПР.

5. Апробация разработанной расчетно-исследовательской подсистемы САПР КМ осуществлена путем решения задачи структурнопараметрического поиска оптимального варианта КМ. Предложен вариант конструкции КМ, позволяющий обеспечить по сравнению с исходным промышленным вариантом машины экономию по меди обмоток статора почти 35% и экономию по электротехнической стали более, чем на 39%. Данная экономия была получена за счет реализации нетиповой конструкции статора. Исследование полевой динамической модели данной КМ позволил сделать вывод об удовлетворительных динамических характеристиках машины.

Дальнейшее направление работ состоит в расширении возможностей подсистемы структурно-параметрической оптимизации КМ, позволяющей ей надежно находить оптимальное решение, отличающееся непредсказуемыми вариантами конструктивного исполнения машины, а также позволяющей данной системе самообучаться на всем периоде функционирования.

Основные результаты работы:

1. Осуществлен анализ проблем автоматизации проектирования КМ. Выявлены возможности формулировки и решения задачи структурнопараметрической оптимизации КМ с использованием полевой модели магнитного поля.

- Разработана версия параметрического генератора конечно-элементной модели КМ, позволяющего формировать по заданному списку параметров модели КМ с произвольным набором технологических элементов, позволяя таким образом учесть в конструкции машины особенности распределения неподвижного относительно статора магнитного поля.
- Разработана оптимизационная модель, позволяющая решить задачу структурно-параметрического синтеза КМ с выходом на нетиповые исполнения машины.
- 4. Разработана полевая динамическая модель КМ, реализуемая на базе современных систем имитационных пакетов и обучаемая на основе серии расчетов магнитного поля. Данная модель по скорости расчета сопоставима с традиционными цепными моделями, что позволяет использовать ее для анализа работы КМ нетиповой конструкции в системах электропривода с использованием современных имитационных пакетов.
- 5. Разработана методика проектирования КМ, в которой впервые реализована идея структурно-параметрической оптимизации машины на основе параметрически генерируемых моделей магнитного поля с последующим имитационным анализом быстродействующей полевой динамической модели КМ произвольной конструкции, обучаемой на серии полевых расчетов. Данная методика является вкладом в разработку научных основ создания систем автоматизации проектирования.
- 6. Разработана структура проектно-исследовательской среды в составе САПР КМ, позволяющей в полной мере реализовать достоинства новой методики проектирования, а также создан рабочий вариант интегрированной проектно-исследовательской среды, доступный для электромашиностроительных предприятий малого и среднего бизнеса.
- Расчетная подсистема САПР КМ опробована при решении задачи поиска оптимальной конструкции КМ.

114

Библиография

- 1. Аветисян Д.А., Соколов В.С., Хан В.Х. Оптимальное проектирование электрических машин на ЭВМ. М.: Энергия, 1976.– 208с.
- Аветисян Д.А. Основы автоматизированного проектирования электромеханических преобразователей: учеб. пособие для электромехан. спец. втузов. – М.: Высш. шк., 1988.– 271с.
- Андриевский А.Б., Андриевский Б.Р., Капитонов А.А., Фрадков А.Л. Решение инженерных задач в среде Scilab. Учебное пособие.— СПб.: НИУ ИТМО, 2013. — 97 с.
- 4. Ануфриев И.Е., Смирнова А.Б., Смирнова Е.Н. MatLab 7. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1004 с.
- Бекишев Р.Ф., Качин С.И., Боровиков Ю.С. Совершенствование коллекторных машин систем электроприводов. Томск: Известия Томского политехнического университета. Технические науки, 2003. Т. 306. № 3. с. 107 113.
- Беляев Е.Ф. Расчет и проектирование электрических машин постоянного тока малой мощности. – Пермь: ПГТУ, 2001. 72 с.
- Бородулин Ю.Б., Мостейкис В.С., Попов Г.В., Шишкин В.П. Автоматизированное проектирование электрических машин: учеб. пособие для студ. вузов, обуч. по спец. "Электромеханика" / под ред. Ю.Б. Бородулина. – М.: Высш. шк., 1989. – 280 с.
- Бородулин Ю.Б., Нуждин В.Н. Имитационные системы в проектировании и исследовании электротехнических объектов и автоматизированных комплексов: учеб. пособие. – Иваново, 1986. – 84 с.
- Бородулин Ю.Б., Попов Г.В. Математические методы в САПР электрических машин: учеб. пособие / Иван. гос. ин-т, Иван. энерг. инст. – Иваново, 1986. – 80 с.
- 10. Булатов Л.Н. Автоматизация проектирования асинхронных машин с использованием полевых динамических моделей: дис. канд. тех. наук:

05.13.12: защищена 2013 / Булатов Леонид Николаевич. – Иваново, 2013. – 139 с.

- Булатов Л.Н., Тихонов А.И. Численные методы моделирования динамических режимов асинхронных машин / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». Иваново, 2013. 120 с.
- Васильев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач: учеб. пособ. для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 552 с.
- Веников В.А., Иванов-Смоленский А.В. Физическое моделирование электрических. – М.:, Л.: Гос. энергетическое изд-во, 1956. – 359 с.
- 14. Виноградов Н.В., Виноградов Ю.Н. Как самому рассчитать и сделать электродвигатель. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: «Энергия», 1974. 168 с.
- 15. Волков В.А., Чудинов С.М. Системный анализ для структурнопараметрического синтеза. – Белгород: «Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика», 2012, № 19 (138), Вып. 24/1. – с. 153 – 157.
- 16. Вольдек А.И., Попов В.В.. Электрические машины постоянного тока и трансформаторы: учеб. для вузов. СПб.: Питер, 2008. 320 с.
- 17. Вольдек А.И. Электрические машины: учеб. для вузов 3-е изд., перераб. Л.: Энергия, 1978. 832 с.
- Гольдберг О.Д., Свириденко И.С. Проектирование электрических машин: под ред. О.Д. Гольдберга / 3-е изд. – М.: Высш. шк., 2006. – 432 с.
- 19. Дьяконов В.П. MatLab 6/5 SP1 / 7 + Simulink 5/6. Основы применения. Серия «Библиотека профессионала». М.: СОЛОН-Пресс, 2005. 800 с.
- 20. Дьяконов В.П. MatLab 6/5 SP1 / 7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании. Серия «Библиотека профессионала». М.: СОЛОН-Пресс, 2005. 576 с.
- Ермолин Н.П. Электрические машины малой мощности / учеб. пособ. М.: Высш. шк., 1967. – 504 с.

- 22. Жермен Л.П., Жорж П.Л., Пистр Ф., Безье П. Математика и САПР. В 2-х кн., кн. 2.; пер. с франц. М.: Мир, 1989. 264 с.
- 23. Зайцев А.С., Тихонов А.И. Комбинированный генетический алгоритм оптимизации трансформатора: Материалы десятой международной науч.техн. конф. студ., асп. и молодых ученых «Энергия – 2015». Том 2 / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2015. – с. 220 – 222.
- 24. Зайцев А.С., Тихонов А.И. Система оптимального проектирования трансформаторов. // "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика": Тезисы докладов восемнадцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. Том 2 – М: МЭИ, 2012г. – с.177.
- 25. Зайцев А.С., Трофимович И.В., Тихонов А.И., Романов С.Г. Разработка системы проектирования силовых трансформаторов с использованием генетических алгоритмов для поиска оптимального решения // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XVII Бенардосовские чтения): Материалы междунар. науч.-техн. конф. / Иван. гос. энерг. ун-т. Иваново, 2013. с.156 159.
- 26. Иванов А.В. Разработка моделей и методики проектирования токоограничивающих реакторов из ленты: дис. канд. техн. наук: 05.13.12: 05.13.18.
 Иваново: ИГЭУ, 2011. 126 с.
- Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. М.: Энергия, 1980. 928 с.
- Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные поля и процессы в электрических машинах и их физическое моделирование. М.: Энергия, 1969. 304с.
- 29. Казаков Ю.Б., Мостейкис В.С., Тихонов А.И. Интерактивное проектирование двигателей постоянного тока на ПЭВМ IBM PC/AT: Методические указания к программному комплексу. – Иваново, ИГЭУ, 1994, 32 с.
- 30. Казаков, Ю.Б. Оптимизация геометрии магнитопровода стартерных электродвигателей на основе расчетов магнитных полей: дис. канд. тех. наук:

05.09.01: защищена 1982: утв. 1982 / Казаков Юрий Борисович. – Новочеркасск, 1982. – 156 с.

- Казаков Ю.Б., Щелыкалов Ю.Я. Конечно-элементное моделирование физических полей в электрических машинах; Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина. – Иваново, 2001. – 100 с.
- 32. Климов Д.А. Математическое моделирование динамических режимов работы силовых трансформаторов для автоматизированного проектирования и диагностики: дис . канд. техн. наук. – Иваново: ИГЭУ, 2007. – 143 с.
- 33. Комков Е.Ю. Разработка проектно-диагностического комплекса для оптимизации жизненного цикла силовых трансформаторов с принудительным охлаждением: дис. канд. техн. наук: 05.13.12: 05.14.02. – Иваново: ИГЭУ, 2008. – 178 с.
- 34. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. Учеб. для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001.– 327 с.
- 35. Корнев И.А., Тамьярова М.В., Тихонов А.И. Технология проектирования электрических машин с использованием библиотек моделирования магнитного поля и электрических цепей // (XIX Бенардосовские чтения): Материалы междунар. науч.-техн. конф. / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2017. – Т. 3. – с.198 – 201.
- 36. Корячко В.П., Курейчик В.М., Норенков И.П. Теоретические основы САПР: учеб. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400с.
- 37. Краткое описание ANSOFT Maxwell / ANSYS Maxwell (ANSYS Electromagnetics). [Электронный ресурс] http://ansoft-maxwell.narod.ru
- 38. Кубасов А.С., Серов В.И., Сорин Л.Н. Проектирование тяговых электродвигателей: учеб. пособ для вузов / под ред. А.С. Кубасова. – М.: Транспорт, 1987. – 536 с.
- Кузнецов В.А., Матвеев А.В. Дискретная математическая модель вентильно-индукторного двигателя // Электричество. 2000. № 8. С. 22 27.

- 40. Кузьмик П.К., Маничев В.Б. Системы автоматизированного проектирования. В 9 кн. Кн. 5. Автоматизация функционального проектирования: учеб. пособие для втузов / под ред. И.П. Норенкова. М.: Высш. шк., 1986. 144 с.
- 41. Кулон Ж.-Л., Саббоннадьер Ж.-К. САПР в электротехнике / пер. с франц. – М.:, Мир, 1988. – 208 с.
- 42. Легков А.А., Тихонов А.И. Параметрический генератор конечноэлементной модели магнитного поля машины постоянного тока в PDE-Tool // "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика": Тезисы докладов двадцать второй международной научно-технической конференции студентов и аспирантов (25—26 февраля 2016 г., Москва). В 3 т. Том 2. – М: Издательский дом МЭИ, 2016 г. – с.14.
- 43. Лифанов, В.А. Расчет электрических машин малой мощности: учебное пособие / В.А. Лифанов, Г.В. Помогаев, Н.П. Ермолин. – Челябинск: Издво ЮУрГУ, 2008. – 127 с.
- 44. Лифанов В.А. Электрические машины систем автоматики и бытовой техники: Учебное пособие. – Челябинск: изд. ЮУрГУ, 2006. –237 с.
- 45. Любарский Б. Г., Рябов Е.С. Моделирование электроприводов на основе реактивных индукторных двигателей в среде MatLab Simulink. / «Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB»: труды V международной научной конференции (11 – 13 мая 2011). – Харьков: ФЛП Шейнина Е.В., 2011. – С. 404 – 424.
- 46. Метцлер. К. Расчет универсальных коллекторных двигателей малой мощности. Пер. с нем. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1932. – 100 с.
- 47. Митчел Э., Уайт Р. Метод конечных элементов для уравнений с частными производными. М.: Мир, 1981. 216 с.
- Норенков И.П. Системы автоматизированного проектирования: учеб. пособ. для втузов: В 9 кн. / Кн. 1. Принципы построения и структура. – М.: Высш. шк., 1986. – 127 с.

- 49. Норри Д, де Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов. М.: Мир, 1981. 304 с.
- 50. Обзор свободных программ для численных расчèтов Электронный реcypc: http://s.arboreus.com/2008/03/free-software-for-solving-pdes.html
- Орлов И.Н., Маслов С.И. Системы автоматизированного проектирования электромеханических устройств: учеб. пособ. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 296 с.
- 52. Пайков И.А., Тихонов А.И. Анализ точности расчетов магнитного поля распределительных трансформаторов с использованием двухмерных моделей (XVIII Бенардосовские чтения): Материалы междунар. науч.-техн. конф. / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2015. – Т. 3. – С.185 – 188.
- 53. Пайков И.А., Тихонов А.И. Динамическая модель силового трансформатора на основе расчета магнитного поля методом конечных элементов: Материалы региональной науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых «Энергия – 2012». Том 4 / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2012. – с. 71 – 75.
- 54. Пайков И.А., Тихонов А.И. Способы сокращения размерности в задачах расчета магнитного поля: Материалы десятой международной науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых «Энергия 2015». Том 2 / Иван. гос. энерг. ун-т. Иваново, 2015. с. 211 213.
- 55. Панихин М.В. Исследование переходных процессов и радиопомех в коллекторном двигателе переменного тока: дис. канд. тех. наук: 05.09.01: защищена 2007 / Панихин Михаил Викторович. – Москва, 2007. – 110 с.
- 56. Подобный А.В., Плаксин А.В., Тихонов А.И. Разработка управляемого блока питания для создания экспериментальных исследований УКД: Материалы двенадцатой международной науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых «Энергия – 2017». 4 – 6 апреля 2017. Том 4 / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2017. – С. 40 – 42.
- 57. Подобный А.А., Тамьярова Ю.В., Тихонов А.И. Динамическая полевая модель универсального коллекторного двигателя // "Радиоэлектроника,

электротехника и энергетика": Тезисы докладов двадцать третьей международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. Том 2 – М: МЭИ, 2017 г. – с. 24.

- 58. Подобный А.В., Тамьярова М.В., Тихонов А.И. Полевая динамическая модель универсального коллекторного двигателя в Simulink: Материалы двенадцатой международной науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых «Энергия 2017». 4 6 апреля 2017. Том 4 / Иван. гос. энерг. ун-т. Иваново, 2017. С. 38 40.
- 59. Подобный А.В., Тихонов А.И. Управление электромеханическими узлами при автоматизации эксперимента на платформе Arduino // "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика": Тезисы докладов двадцать второй международной научно-технической конференции студентов и аспирантов (25—26 февраля 2016 г., Москва). В 3 т. Том 2. – М: Издательский дом МЭИ, 2016 г. – с.21.
- 60. Проектирование электрических машин: учебник для вузов / под ред. И. П.
 Копылова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2011. 767 с.
- 61. Рубцов Д.В., Тихонов А.И. Система проектирования двигателей постоянного тока в среде Excel под Windows // "Радиотехника и электротехнологии в народном хозяйстве": Тезисы докл. н.-т. конф. студ. и асп. вузов России. – Москва, МЭИ, 25 – 26 февраля 1998. – С. 40.
- 62. Рындин Е.А., Лысенко И.Е. Решение задач математической физики в системе MatLab. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005. 62 с.
- 63. Сегерленд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979.
 392 с.
- 64. Семенов А.С. Моделирование реостатного пуска двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. – "Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. Технические науки", 2014. – №9. – С. 29 – 34.
- 65. Семенова К.В., Тамьярова М.В., Тихонов А.И. Технология моделирования динамических режимов электрических машин и аппаратов на основе

моделей квазистационарного магнитного поля // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2017. – № 3 (23). – С.160 – 174.

- 66. Сергеев В.Д., Проскуренко С.С. Электрические машины систем автоматики / метод. указ. к лаб. раб. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2005. – 20 с.
- 67. Сильвестер П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков: пер. с англ. М.: Мир, 1986. 229 с.
- 68. Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами / Под ред. Круповича В.И. – М.: Энергоиздат, 1982. – 416 с.
- 69. Справочник по электрическим машинам: в 2 т. / Под общ. ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. Т. 1. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.
- 70. Статор электрической машины постоянного тока: а. с. 151805 МКИ Н02К1/12 / Ю.Б. Казаков, А.И. Тихонов. Выдано 29.02.88, опубл. бюл. № 36. С. 123.
- 71. Стренг Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов. М.: Мир, 1977.
 350 с.
- 72. Стулов А.В., Трофимович И.А., Тихонов А.И. Современные тенденции в проектировании силовых трансформаторов: Материалы междунар. науч.техн. конф. XIX Бенардосовские чтения / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2017. – Т. 3. – с. 182 – 184.
- 73. Тамьяров А.В., Тамьярова М.В. Аппроксимация передаточных функций оптимальных регуляторов высокого порядка систем автоматического управления // Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева. 2011. № 17. С. 94 99.
- 74. Тамьярова М.В. Легков А.А., Тихонов А.И. Подсистема параметрической генерации и анализа конечно-элементных моделей электрических машин на основе библиотеки EMLib. – Пенза: "XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего", Серия: Технические науки. Технология производства

продуктов. Информатика, вычислительная техника и управление. 05(33)/2016. – С. 121 – 125.

- 75. Тамьярова М.В. Оптимальная стохастическая система активной виброзащиты сложных электромеханических систем // Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева. 2011. № 18. С. 72 80.
- 76. Тамьярова М.В., Подобный А.В., Тихонов А.И. Разработка системы автоматизации экспериментальных исследований электрических машин на основе виртуального лабораторного стенда / В сборнике: Теория и практика имитационного моделирования и создания тренажеров. Сборник статей международной научно-практической конференции. 2016. С. 168 – 177.
- 77. Тамьярова М.В. Технология проектирования энергоэффективных преобраззователей электроэнергии на основе программируемых полевых моделей // В сборнике: Вопросы теории и проектирования электрических машин. – Ульяновск.: УлГТУ, 2017. – С. 257 – 273.
- 78. Тамьярова М.В., Тихонов А.И., Гусенков А.В. Технология моделирования электротехнических систем в MatLab Simulink с использованием полевых моделей: Материалы двенадцатой международной науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых «Энергия – 2017». 4 – 6 апреля 2017. Том 2 / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2017. – с. 160 – 161.
- 79. Тамьярова М.В., Тихонов А.И., Гусенков А.В. Универсальная нелинейная полевая динамическая модель электрической машины в среде Simulink // (XIX Бенардосовские чтения): Материалы междунар. науч.-техн. конф. / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2017. – Т. 3. – С. 195 – 198.
- 80. Тамьярова М.В., Тихонов А.И. Разработка технологии нового поколения для инженерных расчетов электромеханических систем / В книге: Эффективные системы менеджмента: качество, инновации, устойчивое развитие: Материалы VI Международного научно-практического форума. Под редакцией И.И. Антоновой. – Казань: 2017. – Ч. 1. – С. 373 – 377.

- 81. Тамьярова М.В., Тихонов А.И. Создание систем инженерного анализа электромеханических устройств на базе произвольно выбранных математических пакетов / В сборнике: 21 century: fundamental science and technology X Proceedings of the Conference. н.-и. ц. «Академический». 2016. – С. 137 – 139.
- 82. Терехин В.Б. Моделирование электропривода в Simulink (MatLab 7.0.1): учеб. пособ. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 292 с.
- 83. Тихонов А.И., Булатов Л.Н. Платформонезависимая библиотека конечноэлементного моделирования магнитного поля / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – № 2011614852. Заявка № 2011613040, приоритет от 28.04.2011, Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 22.06.2011.
- 84. Тихонов А.И., Гусенков А.В., Тамьярова Ю.В., Подобный А.В. Технология моделирования в Simulink динамических режимов работы электрических машин с использованием библиотеки полевых расчетов. – Иваново: "Вестник ИГЭУ", 2016, Вып. 6. – С. 57 – 65.
- 85. Тихонов А.И., Зайцев А.С., Стулов А.В., Трофимович И.А. Разработка подсистемы оптимизации САПР распределительных трансформаторов. – Иваново: "Вестник ИГЭУ", 2014, Вып. 6. – с. 87 – 91.
- 86. Тихонов А.И., Иванов А.В., Пайков И.А., Стулов А.В. Математическое моделирование электромагнитных процессов в фольговых обмотках трансформаторов и токоограничивающих реакторов / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». Иваново, 2015. 80 с.
- 87. Тихонов А.И., Казаков Ю.Б. Программирование численного эксперимента с использованием конечно-элементной модели магнитного поля в объ-

ектах электромеханики / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 80 с.

- 88. Тихонов А.И., Лихачева А.В., Рубцов Д.В. Моделирование электромеханических устройств в среде Simulink: метод. указ. к лаб. практикуму по теории подобия и моделирования / А.И. Тихонов, А.В. Лихачева, Д.В. Рубцов; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2015. – 48 с.
- 89. Тихонов А.И., Казаков Ю.Б., Рубцов Д.В. Электрические машины постоянного тока: Учеб. пособие к электронному учебнику / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2009. – 128 с.
- 90. Тихонов А.И., Лихачева А.В., Тамьярова М.В. Исследование системы стабилизации напряжения генератора постоянного токав среде Simulink: метод. указ. / ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2017. – 36 с.
- 91. Тихонов А.И. Основы теории подобия и моделирования: учеб. пособие / 2-е изд. доп. и перераб. / ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2016. – 116 с.
- 92. Тихонов А.И., Пайков И.А. Анализ моделей для электромагнитного расчета силовых трансформаторов. – Иваново: "Вестник ИГЭУ", 2015. – Вып. 3. – с. 38 – 43.
- 93. Тихонов А.И. Проектирование явнополюсных двигателей постоянного тока в среде Excel под Windows: Методические указания к курсовому и дипломному проектированию по курсу "Электрические машины". – Иваново, ИГЭУ, 1998. – 24 с.
- 94. Тихонов А.И. Разработка моделей и методов анализа и синтеза решений в автоматизированном проектировании электромеханических устройств: дис. док. тех. наук: 05.13.12: защищена 2007: утв. 2008 / Тихонов Андрей Ильич. – Иваново, 2007. – 262 с.

- 95. Тихонов А.И. Статор четырехполюсной коллекторной электрической машины. № 113089. Заявка № 2011131574, приоритет от 27.07.11, зарегистрировано в гос. реестре 27.01.12. Срок действия 27.07.2021.
- 96. Тихонов А.И., Шишкин В.П. Диалоговое проектирование электро механических устройств в среде Excel // "СРС в условиях современной информационной среды": Тезисы докл. Всерос. н.-методич. конф. – Н.-Новгород, 1998. – 0.1 п.л.
- 97. Тихонов А.И., Шмелев А.С., Тихонов Д.А. Модели электрического и магнитного полей, адаптированные к технологии параллельных вычислений / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2014. – 100 с.
- 98. Толвинский В.А. Электрические машины постоянного тока. М, Л: Государственное энергетическое издательство, 1956. – 408 с.
- 99. Узарс В.Я., Санява Д., Феоктистов В.П., Чернов Е.Т., Чуверин Ю.Ю. Главный полюс электрической машины постоянного тока: а. с. SU 1644300 A1, МКИ Н02К1/08. – Заявка 4623445, 22.12.1988. Опубликовано 23.04.91.
- 100. Хвостов В.С. Электрические машины. Машины постоянного тока / под ред. И.П. Копылова. – М.: Высш. шк., 1988. – 334 с.
- 101. Химмелблау, Д. Прикладное нелинейное програмирование / Д. Химмелблау. – М.: Мир, 1975. – 534 с.
- 102. Цопов Г.И., Овсянников В.Н. Проектирование коллекторных электродвигателей переменного тока малой мощности: учеб. пособ. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2011. – 114 с.
- 103. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
- 104. Ширинский С.В. Методы анализа электрических машин. [Электронный pecypc] – http://elmech.mpei.ac.ru/EM-analysis/textbook.pdf

- 105. Шишкин В.П. Электрические микромашины: учебное пособие / Ивановский энергетический институт имени В. И. Ленина; под ред. Ю. Б. Казакова. – Иваново: Б.и., 1991. – 80 с.
- 106. Шмелев А.С., Пайков И.А., Булатов Л.Н. Методика организации численного исследования электротехнических устройств с использованием библиотеки конечно-элементного моделирования магнитного поля. – Иваново: Вестник ИГЭУ, 2014. – № 1. – С. 55 – 61.
- 107. Электродвигатель постоянного тока серии 4П. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ИИЦЯ 527.214.003 TO, 1987г., 16 с.
- 108. FiniteEleventsinSciLab/Электронныйресурсhttps://wiki.scilab.org/Finite%20Elements%20in%20Scilab
- 109. Kohzai joshinori Oyama Shigaki. Двигатель постоянного тока с Шобразными дополнительными полюсами. Патент США кл. 310/186 N 422088 заявл. 8.03.78 N 884586 опубл. 2.09.80, приор. 12.04.77, N 52/40953, Япония, МКЭ НО2 К1/10.
- 110. Optimization Toolbox. Решение стандартных и больших задач оптимизации. Электронный pecypc https://matlab.ru/products/optimizationtoolbox/optimization-toolbox-rus web.pdf
- 111. Тамьярова М.В., Тихонов А.И. Методика структурно-параметрической оптимизации коллекторных машин с использованием модели магнитного поля и генетического алгоритма. Иваново: "Вестник ИГЭУ", 2018, Вып. 5, с. 46 55.
- 112. Гусенков А.В., Тихонов А.И., Тамьярова М.В., Подобный А.В. Технология инженернерных расчетов электротехнических устройств с использованием автономных наукоемких библиотек Modern engineering and innovative technologies. Heutiges Ingenieurwesen und innovative Technologien // International periodic scientific journal. Ovtober 2018. Issue 5 / Vol. 1. – C. 42 – 55.

- 113. Тамьяров А.В., Тамьярова М.В., Тихонов А.И. Облегченная машина постоянного тока для авиатехники // Известия Самарского научного центра РАН. – Самара: 2018. – № 4(3). – Т. 20. – С.435 – 440.
- 114. Тихонов А.И., Тамьярова М.В. Использование библиотеки конечноэлементного моделирования магнитного поля EMLib в задачах анализа и синтеза электромеханических устройств. // Материалы: XXVI международная конференция «Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования)», НИУ МЭИ. – М.: ИНФРА-М. – 2018. – С.562 – 575.
- 115. Tikhonov A., Kulenko. M., Tamyarova M., Gusenkov A. Dynamic Field Model of Brushed DC Motor for Electric Drive Systems Research, ICPDS 2018 – Proceedings of 10th International Conference on Electrical Power Drive Systems ICEPDS 2018 accepted for publication in IEEE; Novocherkassk, Russian Federation; October 3 – 6, 2018.
- 116. Евгенев Г., Кобелев К., Кузьмин Б. СПРУТ-АD процесс проектирования в одной кнопке. – САПР и Графика - № 5. – 2002. URL: https://sapr.ru/article/7289.
- 117. Разработка первой очереди САПР машин постоянного тока общепромышленного и специального назначения с различными критериями оптимальности. Ч.1. Разработка новых принципов расчета электромагнитных процессов в машинах постоянного тока:Промежуточный отчет : НИР / Б. Ф. Токарев, Моск. энерг. ин-т (МЭИ), Кафедра электромеханики (ЭМ). – М., 1993. – 69 с.
- 118. Тихонов А.И., Тамьярова М.В., Подобный А.В. Система генерации и исследований полевой динамической модели универсального коллекторного двигателя / Свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ, № 2019615127, дата гос. регистрации 18.04.2019.

Приложения



УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора по техническому развитию, кандидат технических наук А.В. Стулов



внедрения методики имитационного моделирования работы электротехнических устройств

В практику научных исследований и проектирования силовых трансформаторов на ООО «Трансформер» внедряется методика имитационного моделирования работы электротехнических устройств, в том числе и силовых трансформаторов, позволяющая реализовать численное исследование произвольных режимов работы данных устройств с использованием имитационных пакетов, в частности, MatLab Simulink и SciLab Xcos.

Внедряемая методика являются результатом диссертационной работы Тамьяровой М.В. Научная и практическая значимость результатов работы состоит в разработке универсальной динамической модели электротехнического устройства произвольной конструкции, основанного на индукционном принципе действия. Модель строится на серии расчетов магнитного поля с использованием библиотеки конечно-элементного моделирования EMLib. Результаты серии расчетов используются в качестве параметров табличных функций динамической модели устройства, представленной в виде структурной схемы, рассчитывающей величины, передаваемые в управляемые источники тока и ЭДС электрической схемы замещения устройства.

Данная методика позволяет учесть влияние на динамические характеристики моделируемого устройства всех особенностей конструкции его магнитной системы, что характерно для полевых моделей. Однако по быстродействию разработанная модель сопоставима с упрощенными цепными моделями, что позволяет включать ее в качестве подсистемы в модели электрических цепей, реализуемые с помощью современных имитационных пакетов. Это дает возможность исследовать моделируемое устройство в различных режимах работы и в различных применениях в режиме имитации эксперимента в реальном времени.

Директор по НИОКР, к.т.н.

Sef

В.И. Печенкин



Акт

внедрения полевой динамической модели универсальных коллекторных двигателей

Полевая динамическая модель универсальных коллекторных двигателей (УКД) внедряется в учебный процесс на кафедре «Информационные и измерительные комплексы». Внедряемая модель представляет собой структурную блок MatLab Simulink SimPowerSystem, который может быть использован при разработке и исследовании в динамики систем электроприводов, в состав которых включены УКД. Функционирование модели поддерживается набором программных средств, осуществляющих следующие операции:

- 1) управление процессом формирования модели (книга MSExcel);
- автоматическая генерация конечно-элементной модели по заданному списку исходных данных (макрос VBA в книге MSExcel, обращающийся к функциям библиотеки конечно-элементного моделирования магнитного поля EMLib);
- автоматическая серия расчетов на созданной конечно-элементной модели магнитного поля и матриц зависимостей индуктивностей, ЭДС вращения и электромагнитного момента от токов обмотки якоря и обмотки возбуждения (макрос VBA и библиотека EMLib);
- 4) функция экспорта полученных матриц в среду MatLab для формирования полевой динамической модели УКД (макрос VBA и командный m-файл в MatLab.

Система является результатом диссертационной работы Тамьяровой М.В. Научная и практическая значимость результатов работы состоит в следующем: разработана динамическая модель УКД, позволяющая учесть влияние на динамические характеристики всех особенностей конструкции магнитной системы машины. При этом быстродействие модели соответствует быстродействию цепной модели, что позволяет исследовать работу УКД в системе электропривода реальном времени с использованием средств MatLab Simulink SimPowerSystem. Разработаны программные средства, позволяющие формировать модель в интерактивном режиме без руинных операций.

Система используется при проведении лабораторных работ в курсах Основы автоматического управления и Моделирования переходных режимов, а также в дипломном и курсовом проектировании.

Зав. каф. ИВК, д.т.н.,

/ Киселев С.К. /

Старший преподаватель каф.

/ Тамьярова М.В./

133 тверждаю Троректор по научной работе ИГЭУ / Тютиков В.В./ 13 aucus 2019 г.

внедрения системы численных исследований коллекторных машин на основе параметрически генерируемых моделей магнитного поля

Система численных исследований коллекторных машин, внедряется в учебный процесс на кафедре Электромеханики ИГЭУ. Внедряемая система представляет собой рабочую книгу MSExcel, в которой присутствуют интерактивные средства управления численным экспериментом, реализованные с помощью макросов во встроенной системе программирования VBA, обращающихся к функциям библиотеки моделирования магнитного поля EMLib и функциям математического пакета MatLab.

Система позволяет осуществлять следующие операции:

- параметрическую генерацию конечно-элементной модели магнитного поля коллекторной машины произвольной конструкции по заданному списку параметров, характеризующих расчетную область машины;
- расчет характеристики намагничивания машины и рабочих характеристик с обращением к модели магнитного поля;
- построение полевой динамической модели коллекторной машины на основании серии расчетов магнитного поля;
- анализ полевой динамической модели коллекторной машины в различных режимах работы.

Система является результатом диссертационной работы Тамьяровой М.В. Научная и практическая значимость результатов работы состоит в следующем:

- разработан параметрический генератор конечно-элементной модели магнитного поля коллекторной машины, позволяющий автоматически строить полевые модели различных исполнений машины, в том числе нетиповых;
- разработана быстродействующая полевая динамическая модель коллекторной машины, которая может быть интегрирована в произвольные модели электромеханических систем, создаваемые в MatLab Simulink SimPowerSystem;
- разработан алгоритм обучения динамической модели коллекторной машины на результатах серии расчетов магнитного поля.

Система используется при проведении лабораторных работ и в дипломном проектировании.

Зав. каф. электромеханики, д.т.н., проф. / Казаков Ю.Б. /



П1. Установка для экспериментальных исследований УКД

Рис. П1.1. УКД серии УЛ-041-28УХЛ4



Рис. П1.2. Испытательный стенд



Рис. П1.3. Система управления испытательным стендом на стадии разработки



Рис. П1.4. Принципиальная схема испытательного стенда

П2. Результаты исследований пуска КМ, полученной в ходе структурно-параметрической оптимизации



Рис. П2.1. Конечно-элементная модель исходной машины



Рис. П2.2. Конечно-элементная модель машины, полученной в ходе структурно-параметрической оптимизации



Рис. П2.3. Картина поля в номинальном режиме





Рис. П2.3. Зависимость электромагнитного момента от времени при пуска на

номинальную нагрузку





П.2.4. Индукция в зазоре в разные моменты времени



П.2.5. Картина магнитного поля при пуске на номинальную нагрузку в момент времени t = 0,001 с

Ток ШОВ: I_f = -0,167 A Ток ОЯ: Ia = 18 A Величина магнитного потока: Ф = 0,0003756 Вб



П.2.6. Картина магнитного поля при пуске на номинальную нагрузку в момент времени t = 0,0022 c

Ток ШОВ: I_f = -0,25 A Ток ОЯ: Ia = 37,76 A Величина магнитного потока: $\Phi = 0,000619$ Вб



П.2.7. Картина магнитного поля при пуске на номинальную нагрузку в момент времени t = 0,005 c

Ток ШОВ: $I_f = -0,143$ A Ток ОЯ: Ia = 46,86 A Величина магнитного потока: $\Phi = 0,00106$ Bб



П.2.8. Картина магнитного поля при пуске на номинальную нагрузку в момент времени t = 0,035 с

Ток ШОВ: I_f = 0,12 A Ток ОЯ: Ia = 30 A Величина магнитного потока: Ф = 0,00216 Вб



П.2.9. Картина магнитного поля при пуске на номинальную нагрузку в момент времени t = 0,05 с

Ток ШОВ: I_f = 0,123 A Ток ОЯ: Ia = 21,54 A Величина магнитного потока: Ф = 0,001785 Bб


П.2.9. Картина магнитного поля при пуске на номинальную нагрузку в момент времени t = 0,5 с

Ток ШОВ: I_f = 0,137 A Ток ОЯ: Ia = 4,14 A Величина магнитного потока: Ф = 0,001557 Вб