

На правах рукописи

БУЛАТОВ Леонид Николаевич

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
АСИНХРОННЫХ МАШИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ПОЛЕВЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ**

Специальность:

05.13.12. – Системы автоматизации проектирования
(электротехника, энергетика)

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Иваново – 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ).

Научный руководитель	Тихонов Андрей Ильич , доктор технических наук, профессор
Официальные оппоненты	Казаков Юрий Борисович , доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», заведующий кафедрой «Электромеханика» Кроль Татьяна Яковлевна , кандидат технических наук, Ивановский центр информационных технологий – филиал ОАО «Электротромонтаж», директор
Ведущая организация	Открытое акционерное общество «Ярославский электромашиностроительный завод» (ОАО «ELDIN»)

Защита состоится 25 июня 2013 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.02 при ИГЭУ по адресу: г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, ауд. Б-301.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим присылать по адресу: 153003, г. Иваново, Рабфаковская, 34, Ученый совет ИГЭУ. Тел.: (4932) 38-57-12, факс: (4932) 38-57-01. E-mail: uch_sovet@ispu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГЭУ, автореферат размещён на сайте www.ispu.ru.

Автореферат разослан 24 мая 2013 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
Д 212.064.02

Тютиков
Владимир Валентинович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие электрических машин во многом определяет ход технического прогресса. Непрерывное совершенствование материалов, технологии производства и разнообразие условий эксплуатации влекут за собой появление новых конструкций электрических машин. Это вызывает необходимость постоянного совершенствования теоретической базы, методов проектирования и исследований.

До 80% всех электродвигателей, выпускаемых промышленностью, приходится на долю асинхронных двигателей (АД), поэтому разработка эффективных методов моделирования в целях совершенствования конструкции этих машин является актуальной задачей. Одним из направлений совершенствования конструкции АД является улучшение их динамических характеристик.

В настоящее время наблюдается тенденция вытеснения экспериментальных методов исследования опытных образцов электрических машин численным экспериментом с использованием точных математических моделей на основе теории поля и цепей. Наиболее распространенными в этом плане являются модели, построенные на основе метода конечных элементов. Преимуществом таких моделей является возможность учета особенностей конструкции исследуемого устройства, в том числе, в динамических режимах работы. Универсальные системы инженерных расчетов, позволяющие формировать и исследовать полевые модели электрических машин, являются необходимыми элементами современных систем автоматизированного проектирования (САПР) АД. Среди них популярны такие программные продукты, как Ansys, Maxwell, Comsol, ElCut и др. Несмотря на широкие возможности, такие продукты имеют ряд недостатков, в частности высокую стоимость, наличие излишнего с точки зрения конечного пользователя функционала, в то же время ограничение возможностей систем изначально заложенным в них функционалом, закрытость большинства алгоритмов, значительное время решения полевых задач и т.п. Это ограничивает возможности научного использования таких пакетов.

Вместе с тем развивается перспективное направление численного моделирования, связанное с формированием наукоемких моделей из доступных мобильных компонентов, комбинируемых друг с другом средствами базовой системы программирования. Такой подход позволяет создавать гибкие модели, соответствующие целям конкретного исследова-

ния, достигая зачастую эффектов, которые изначально не предполагались ни в одном из используемых компонентов.

Таким образом, актуальным является применение и развитие компонентной технологии для решения задач моделирования динамических режимов работы АД с короткозамкнутым ротором с учетом особенностей конструкции, нелинейности характеристик материалов, эффекта вытеснения тока в пазах ротора и т.п. Актуальной также является проблема построения быстродействующих моделей динамических режимов АД с точностью, не уступающей точности полевых расчетов. Это, в частности, предполагает использование современных технологий параллельных вычислений, в том числе, с использованием высокопроизводительных кластерных систем.

Диссертационная работа выполнялась в Ивановском государственном энергетическом университете. Работа соответствует паспорту специальности 05.13.12 «Системы автоматизации проектирования (по отраслям)», так как содержит результаты разработки научных основ построения средств САПР, в частности разработки и исследования моделей, алгоритмов и методов для синтеза и анализа проектных решений в САПР АД. **Цель работы** заключается в повышении эффективности проектирования асинхронных двигателей путем применения комбинированных математических моделей для синтеза и анализа проектных решений.

Задачи, решаемые в диссертации:

1. Разработка платформнезависимой версии библиотеки конечно-элементного моделирования магнитного поля, отличающейся оптимизацией алгоритмов в целях повышения эффективности разрабатываемой динамической модели электрической машины.
2. Разработка программных средств для параметрической генерации конечно-элементных полевых моделей проектируемого двигателя.
3. Разработка комбинированной математической модели асинхронной машины, опирающейся на использование результатов расчета магнитного поля в уравнениях электрической цепи.
4. Адаптация разработанных программных средств к использованию в современных высокопроизводительных кластерных системах.
5. Разработка расчетной подсистемы САПР АД с возможностью проведения поверочного расчета с использованием разработанных моделей и межплатформенных возможностей созданных программных средств.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является асинхронная машина с короткозамкнутым ротором. Предметом исследования являются системы автоматизированного проектирования АД и

численные модели физических процессов, проходящих в обмотках асинхронной машины с короткозамкнутым ротором в динамических режимах.

Методы исследования. Поставленные задачи решались с использованием методов теории САПР, методологии объектно-ориентированного программирования, теории электромеханических преобразователей энергии, теории магнитного поля, теории электрических цепей, теории численного моделирования физических процессов, в частности, метода конечных элементов, метода контурных токов.

Научная новизна.

1. Разработан способ расширения функционала САПР АД путем интеграции в нее автономных подсистем, обеспечивающих возможность создания дополнительных средств для синтеза конечно-элементных моделей проектируемого устройства, анализа его статических и динамических режимов, автоматизации процесса принятия проектных решений. Данный способ отличается гибкостью при создании новых моделей, основанных на результатах расчета магнитного поля.

2. Разработана полевая динамическая модель АД с короткозамкнутым ротором, основанная на использовании результатов расчета магнитного поля при формировании матрицы индуктивностей системы дифференциальных уравнений, описывающих динамические режимы АД. Данная модель позволяет учесть особенности конструкции АД и физические эффекты, возникающие в динамических режимах.

3. Разработаны способы ускорения расчета полевой динамической модели АД, в том числе: алгоритм реализации на кластерной технике расчета с прямым обращением к полевой модели, алгоритм оптимизации конечно-элементной модели с учетом особенностей задачи, способ, основанный на использовании пятимерной сплайновой аппроксимации результатов серии расчетов магнитного поля для обучения быстродействующей модели АД.

Практическая значимость результатов работы состоит в разработке программных средств, которые могут быть использованы при проектировании асинхронных машин. В частности, были разработаны:

- расширяемый универсальный параметрический генератор конечно-элементной модели асинхронной машины с короткозамкнутым ротором, позволяющий генерировать модели с разной формой пазов;
- платформонезависимая версия библиотеки конечно-элементного моделирования магнитного поля в электрических машинах, которая

- может быть использована как на персональных компьютерах с различными операционными системами, так и на кластерных системах;
- система моделирования динамических режимов в асинхронной машине, позволяющая учитывать эффекты вытеснения тока в пазах ротора при различной форме пазов ротора;
 - базовый вариант расчетной подсистемы САПР АД, основанный на модели динамических режимов АД, который может быть использован как для расчета новых асинхронных машин, так и для проведения научных исследований, в том числе и в рамках НИОКР.

Было произведено исследование возможности модификации основных алгоритмов метода конечных элементов в целях повышения точности и скорости динамического расчета электрических машин.

Разработанные программные средства могут быть использованы в учебных целях, в научных исследованиях, а также на производстве.

По результатам работы получено два акта внедрения: в ОАО "ELDIN" (г. Ярославль) и ОАО НИПТИЭМ (г. Владимир).

Апробация работы. Результаты работы докладывались на конференциях: на международной научно-технической конференции «Современное состояние, проблемы и перспективы энергетики и технологии в энергостроении» (Бенардосовские чтения, г. Иваново, ИГЭУ, 2009, 2011 гг.), на международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, МЭИ, 2009, 2011, 2013 гг.), на региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Энергия» (г. Иваново, ИГЭУ, 2008, 2009, 2012 гг.).

Публикации. По результатам работы опубликовано 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, 2 статьи в периодических изданиях и сборниках статей, 9 тезисов докладов на конференциях, получено 2 свидетельства на программные продукты.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 114 наименований, и приложения. Основная часть работы изложена на 139 страницах и содержит 49 иллюстрации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе проведён анализ современного состояния проблемы проектирования и моделирования асинхронных машин.

Одной из особенностей современного производства электрических машин является разнообразие номенклатуры выпускаемой продукции. При этом время на проектирование каждой партии оказывается ограниченным. Для того чтобы выдержать конкуренцию в этих условиях предприятия вынуждены осваивать современные средства проектирования и моделирования (CAD (Computer-aided design)/CAE (Computer-aided engineering)), позволяющие отказаться от натурных исследований опытных образцов новой продукции в пользу численного моделирования.

Далеко не все предприятия могут позволить себе подготовку и содержание высококвалифицированных специалистов для работы с современными CAD/CAE-системами, а также приобретение коммерческой лицензии на эти системы. Таким образом, задача создания новых доступных гибких программных средств, с помощью которых можно разрабатывать относительно простые в использовании системы проектирования, в частности, асинхронных машин, по своим возможностям не уступающих дорогостоящим наукоемким CAD/CAE-системам, является актуальной.

Альтернативой современным CAD/CAE-системам, пытающимся вместить в себя весь опыт численного решения задач математической физики, может служить модульный подход к построению САПР, при котором САПР организуется на базе некоторой среды, позволяющей создавать, отлаживать и запускать на выполнение подпрограммы, реализующие проектные операции. Задача, поставленная в данной работе, включает в себя разработку модели асинхронного двигателя, которая может быть использована в САПР АД на стадии НИОКР и поверочного расчета, и создание на ее основе расчетных подсистем САПР АД.

Используемые в САПР математические модели можно условно разделить на три уровня: микроуровень (уровень полевых моделей), макроуровень (уровень цепных моделей) и метаяуровень (уровень структурных схем). В работе приводится обзор цепных моделей, применяемых для расчета динамических режимов АД.

В современных системах при моделировании динамических процессов часто используются комбинированные модели, совмещающие в себе возможности моделей микро- и макроуровней. При проектировании АД комбинированные модели могут использоваться для расчета пусковых характеристик с учетом эффекта вытеснения тока в пазах ротора.

Для расчета магнитного поля при создании комбинированной модели динамических режимов АД использовалась модифицированная версия

разработанной в ИГЭУ библиотеки конечно-элементного моделирования магнитных полей EMLib, в которой для расчета магнитного поля решается уравнение Пуассона. Расчет нелинейной системы уравнений, к которой сводится решение задачи, осуществляется итерационным методом. Значения магнитных потенциалов в узлах модели на каждой итерации рассчитываются по формуле

$$\mathbf{A}_{t+1} = \mathbf{A}_t - \alpha_t \cdot \mathbf{D}_t, \quad (1)$$

где \mathbf{A}_{t+1} , \mathbf{A}_t – векторы магнитных потенциалов в узлах конечно-элементной сетки на следующей и текущей итерациях соответственно; α_t – коэффициент релаксации; \mathbf{D} – вектор приращений магнитных потенциалов.

Вектор \mathbf{D} вычисляется по формуле

$$\mathbf{J}_t \mathbf{D}_t = -\mathbf{F}_t. \quad (2)$$

где \mathbf{J} – матрица Якоби; \mathbf{F} – вектор невязок.

Использование собственного средства расчета поля позволяет разрабатывать модели и подсистемы САПР, не зависящие от крупных программных продуктов.

Быстродействие комбинированной модели определяется главным образом временем работы полевой модели. Время расчета, например, процесса пуска АД с использованием комбинированных моделей даже в современных программных продуктах оценивается часами. Поэтому имеет смысл искать способы ускорения работы комбинированной модели.

Для сокращения времени расчета динамических режимов АД с использованием комбинированной модели может быть применена технология параллельных вычислений на кластерных системах. Появление кластерных систем относят к 90-м годам XX века. В общем случае основным параметром классификации параллельных систем является наличие общей (SMP) или распределенной (MPP) памяти. В данной работе применялась технология MPP.

Вторая глава посвящена разработке платформонезависимой библиотеки конечно-элементного моделирования магнитного поля.

Ядром подсистемы расчета динамических режимов работы АД, а также наиболее сложным ее компонентом с точки зрения разработки является библиотека конечно-элементного моделирования магнитных полей. Такая библиотека была разработана в ИГЭУ. Однако она недостаточно адаптирована к использованию в моделях динамических режимов электрических машин, а также к расчетам на кластерной технике. Поэтому было принято решение о переносе алгоритмов библиотеки EMLib на кроссплатформенную основу с одновременным устранением указанных

недостатков. В качестве системы программирования использовалась свободно распространяемая система CodeBlocs, позволяющая создавать приложения на языке C++. С ее помощью была создана автономная библиотека МКЕ_сpp, имеющая следующие отличия от библиотеки EMLib:

- 1) МКЕ_сpp написана на базовой версии языка C++, что расширяет возможности ее использования;
- 2) В МКЕ_сpp оптимизированы вопросы выделения и освобождения памяти;
- 3) МКЕ_сpp более компактна.

Помимо этого, библиотека МКЕ_сpp адаптирована к использованию в динамических моделях электромеханических устройств.

В основе модели динамических режимов работы АД лежит поиск зависимости приращений потокосцеплений обмоток от приращений токов в обмотках и изменения пространственной конфигурации модели. В модели АД с короткозамкнутым ротором приращение потокосцепления k -го контура с током Ψ_k определяется по формуле

$$\frac{d\Psi_k}{dt} = \sum_{j=1}^n \frac{\partial\Psi_k}{\partial i_j} \frac{di_j}{dt} + \frac{\partial\Psi_k}{\partial\alpha} \frac{d\alpha}{dt}. \quad (3)$$

Для определения $\frac{\partial\Psi_k}{\partial i_j} \approx \frac{\Delta\Psi_k}{\Delta i_j}$, $\frac{\partial\Psi_k}{\partial\alpha} \approx \frac{\Delta\Psi_k}{\Delta\alpha}$ необходимо рассчитать, при-

ращения потокосцеплений $\Delta\Psi_k$ при изменении токов в контурах i_j и угла поворота ротора α на величину Δi_j и $\Delta\alpha$. Для этого используется модель магнитного поля исследуемого двигателя. При расчете частных производных от потокосцеплений контуров с током принимается, что $\mu_p = \text{const}$. С учетом этого члены матрицы \mathbf{J} и вектора \mathbf{F} в уравнении (2)

могут быть определены по следующим формулам:

$$\mathbf{F}_i = \sum_{p=1}^{N_\Delta} \left(\frac{1}{4S_p \mu_p} \sum_{j=1}^{j=3} (b_{pi} b_{pj} + c_{pi} c_{pj}) A_{pi} - \frac{1}{3} j_p S_p \right) \Bigg|_{i=1 \div N}, \quad (4)$$

$$\mathbf{J}_{ij} = \sum_{p=1}^{p=N_i} \frac{1}{4S_p} \left[\frac{1}{\mu_p} (b_{pi} b_{pj} + c_{pi} c_{pj}) \right] \Bigg|_{\substack{i=1 \div N \\ j=1 \div N}}. \quad (5)$$

где N_Δ – количество элементов конечно-элементной сетки; b , c – коэффициенты, зависящие от координат узлов конечно-элементной сетки; S_p , j_p , μ_p , A_{pi} – соответственно площадь, плотность тока, магнитная проницаемость и векторные магнитные потенциалы в узлах p -го элемента.

При условии $\mu_p = \text{const}$ (2) является системой линейных уравнений и окончательные значения приращений векторного магнитного потенциала

вычисляются в ходе первой итерации, против 10 и более итераций при стандартном конечно-элементном расчете. Дополнительное ускорение расчета достигается благодаря отсутствию необходимости обращения к библиотеке магнитных характеристик материалов.

Точность расчета момента через магнитную энергию/коэнергию при анализе динамических режимов оказалась неудовлетворительной. Поэтому было принято решение рассчитывать электромагнитный момент по результатам конечно-элементного полевого расчета с использованием формулы суммарного момента магнитных сил, действующих на тела, заключенные в заданном объеме. Для плоскопараллельной задачи формула для расчета момента имеет вид

$$M = \frac{1}{2 \cdot R} \sum_1^{N_E} \left[(X \cdot H_y - Y \cdot H_x)(X \cdot B_x + Y \cdot B_y) + (X \cdot B_y - Y \cdot B_x)(X \cdot B_x + Y \cdot B_y) \right] \Delta L \cdot L_\delta, \quad (6)$$

где X, Y – координаты центра отрезка ΔL , соединяющего точки пересечения элемента конечно-элементной модели выбранной токоограничивающей поверхностью; N_E – число элементов, пересекаемых токоограничивающей поверхностью; H_x, H_y, B_x, B_y – компоненты векторов напряженности и индукции поля в точке X, Y , которые могут быть получены из конечно-элементной модели.

Третья глава посвящена разработке динамической модели пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. При ее создании принимались допущения о том, что магнитное поле является квазистатическим, а в магнитной системе машины не наводятся вихревые токи.

Модель строится на основе системы дифференциальных уравнений

$$L \frac{d}{dt} \mathbf{i} = \mathbf{u} - \mathbf{Ri}. \quad (9)$$

Механическая составляющая представлена уравнением

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \sum M. \quad (10)$$

Здесь L – матрица индуктивностей контуров; \mathbf{u} – столбец мгновенных значений напряжений контуров; \mathbf{R} – матрица сопротивлений контуров; \mathbf{i} – вектор мгновенных значений токов в контурах; ω – угловая скорость вращения ротора; J – момент инерции ротора; $\sum M$ – сумма моментов на валу ротора.

При формировании системы уравнений в модели используются схемы замещения, показанные на рис. 1–3.

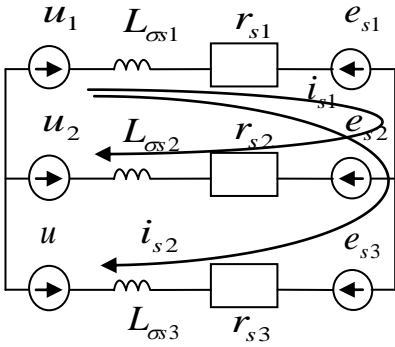


Рис. 1. Схема замещения статора

В приведенной на рис. 3 схеме замещения паз ротора разбит на p_s слоев. Это позволяет учесть эффект вытеснения тока в пазах короткозамкнутого ротора. При этом количество уравнений, описывающих ротор, увеличивается в p_s раз. Соответственно, увеличивается и число обращений к конечно-элементной модели на каждом шаге итераций.

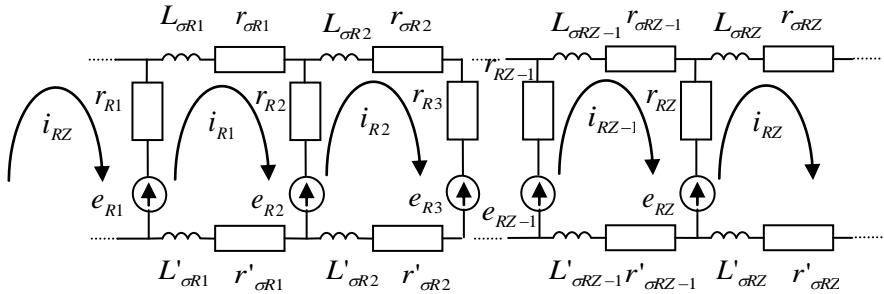


Рис. 2. Схема замещения короткозамкнутого ротора

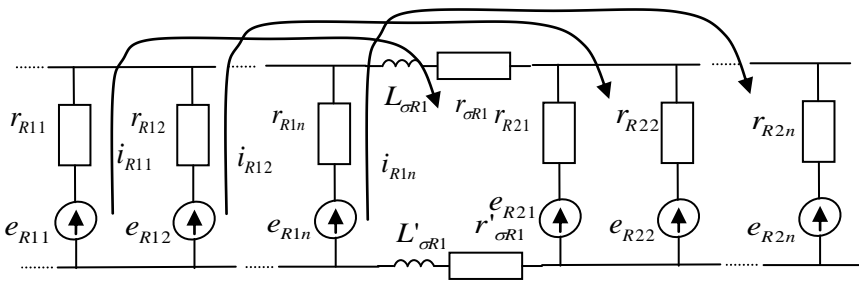


Рис. 3. Схема замещения ротора с разбиением пазов на слои

Величина p_s зависит от формы пазов и размеров магнитной системы машины.

На основании приведенных схем замещения формируется система дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l}
u_1 - u_3 = i_1 r_{s1} + \frac{d\Psi_1}{dt} + (i_1 + i_2) r_{s3} - \frac{d\Psi_3}{dt} + (L_{\sigma s1} + L_{\sigma s3}) \cdot \frac{di_1}{dt} + L_{\sigma s3} \cdot \frac{di_2}{dt}, \\
u_2 - u_3 = i_2 r_2 + \frac{d\Psi_2}{dt} + (i_1 + i_2) r_{s3} - \frac{d\Psi_3}{dt} + (L_{\sigma s2} + L_{\sigma s3}) \cdot \frac{di_2}{dt} + L_{\sigma s3} \cdot \frac{di_1}{dt}, \\
0 = \left(-i_{N-ns+i} r_{N-ns+i} + i_1 \cdot r_{Ri-2} - i_{2+ns} r_{R2+ns} + (L_{\sigma Ri} + L'_{\sigma Ri}) \cdot \frac{di_{Ri}}{dt} + \frac{d\Psi_i}{dt} \right) \Big|_{i=1..ns}, \\
0 = \left(-i_{1-ns} r_{Ri-ns-2} + i_1 \cdot r_{Ri-2} - i_{i+ns} r_{Ri+ns-2} + (L_{\sigma Ri} + L'_{\sigma Ri}) \cdot \frac{di_{Ri}}{dt} + \frac{d\Psi_i}{dt} \right) \Big|_{i=3+ns\dots N-ns}, \\
0 = \left(-i_{1-ns} r_{Ri-ns-2} + i_1 \cdot r_{Ri-2} - i_{2+ns} r_{R2+ns} + (L_{\sigma Ri} + L'_{\sigma Ri}) \cdot \frac{di_{Ri}}{dt} + \frac{d\Psi_i}{dt} \right) \Big|_{i=N-ns+1\dots N}, \\
\frac{d\alpha}{dt} = \omega, \\
\frac{d\omega}{dt} = \frac{M - M_H - M_0}{J},
\end{array} \right. \quad (9)$$

$$r_{Rji} = \begin{cases} r_{R1i} + r_{R2i} + r_{\sigma R1i} + r'_{\sigma R1i}, & \text{если } j=1, \\
r_{Rji} + r_{R(j+1)i} + r_{\sigma Rji} + r'_{\sigma Rji}, & \text{если } 1 < j < Z_2, \\
r_{RZ_2i} + r_{R1i} + r_{\sigma RZ_2i} + r'_{\sigma RZ_2i}, & \text{если } j = Z_2. \end{cases} \quad (10)$$

В матричном виде данная система уравнений имеет вид

$$\mathbf{L} \cdot \frac{d}{dt} \mathbf{x} = \mathbf{U}, \quad (11)$$

где \mathbf{x} – вектор искомых величин.

Шаг по времени в модели должен определяться из условия

$$dt_{\max} = \frac{P}{2 \cdot f \cdot Z \cdot 2} = \frac{P}{4 \cdot f \cdot Z}, \quad (12)$$

где Z – число зубцов ротора в случае, когда оно равно или превышает число зубцов статора, или число зубцов статора в другом случае; p – число пар полюсов АД; f – частота.

Основные трудности при расчете динамических режимов АД с использованием разработанной модели связаны с расчетом матрицы \mathbf{L} . С использованием описанного математического аппарата было разработано несколько вариантов динамической модели, отличающихся способом получения матрицы \mathbf{L} .

В модели с прямым обращением к полевой модели $\frac{\partial \Psi_m}{\partial i}$, $\frac{\partial \Psi_m}{\partial \alpha}$ и, соответственно, элементы матрицы \mathbf{L} определяются с использованием серии

конечно-элементных расчетов магнитного поля на каждом шаге итерации. Главными достоинствами данной модели являются точность и универсальность, а основным недостатком – низкая скорость расчета.

В модели с предварительным расчетом матрицы потокосцеплений элементы матрицы \mathbf{L} определяются из полученных предварительно зависимостей $\Psi_i = f(F_x, F_y, \alpha)$, где F_x и F_y – составляющие результирующей намагничивающей силы машины. В этой модели приняты следующие допущения:

- 1) обмотки АД создают синусоидальную намагничивающую силу;
- 2) картина магнитного поля определяется результирующей намагничивающей силой машины.

При расчете переходного процесса данным методом приращения потокосцеплений по времени определяются по формуле

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_m}{dt} &= \frac{\partial\Psi_m}{\partial F_x} \frac{dF_x}{dt} + \frac{\partial\Psi_m}{\partial F_y} \frac{dF_y}{dt} + \frac{\partial\Psi_m}{\partial \alpha} \frac{d\alpha}{dt} = \sum_{j=1}^{3+Z_2 \cdot ns} \left(\frac{\partial\Psi_m}{\partial F_x} \frac{dF_{xj}}{dt} + \frac{\partial\Psi_m}{\partial F_y} \frac{dF_{yj}}{dt} \right) + \frac{\partial\Psi_m}{\partial \alpha} \frac{d\alpha}{dt} = \\ &= \sum_{j=1}^{3+Z_2 \cdot ns} \left(\frac{\partial\Psi_m}{\partial F_x} K_{xj} + \frac{\partial\Psi_m}{\partial F_y} K_{yj} \right) \frac{di_j}{dt} + \frac{\partial\Psi_m}{\partial \alpha} \frac{d\alpha}{dt} = \sum_{j=1}^{3+Z_2 \cdot ns} L_{mj} \frac{di_j}{dt} + \frac{\partial\Psi_m}{\partial \alpha} \frac{d\alpha}{dt}, \end{aligned} \quad (13)$$

Приращения потокосцеплений определяются из полученных на этапе предварительного расчета зависимостей $\Psi_i = f(F_{xS}, F_{yS}, \alpha)$, аппроксимированных трехмерными сплайнами.

Второе допущение серьезно снизило точность расчета, поэтому был разработан модифицированный вариант метода, в котором на этапе предварительного расчета определяются зависимости $\Psi_i = f(F_{xS}, F_{yS}, F_{xR}, F_{yR}, \alpha)$, где $F_{xS}, F_{yS}, F_{xR}, F_{yR}$ – составляющие НС статора и ротора соответственно по осям X и Y. Это повышает время предварительного расчета и объем хранимых данных, однако позволяет получить точность, близкую к точности модели с прямым обращением к полевой модели. Отсутствие необходимости обращения к конечно-элементной модели на каждой итерации динамического расчета позволяет достигнуть скорости расчета, близкой к аналитическим моделям.

Было произведено сравнение результатов, полученных с использованием моделей, с опытными данными (рис. 4), а также с результатами, полученными с использованием современных систем. Сравнение показало, что созданные модели позволяют получать достоверные результаты, не уступая по скорости расчета системам, имеющимся на рынке.

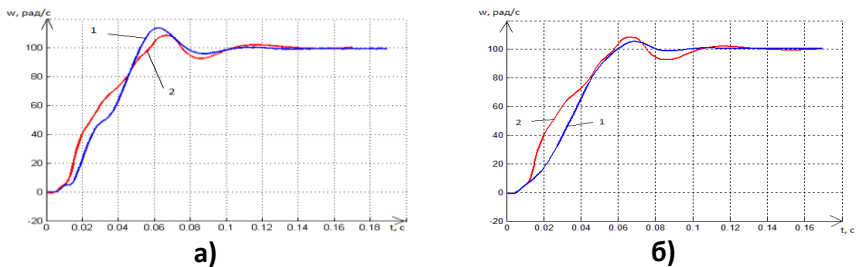


Рис. 4. Зависимость скорости вращения ротора от времени: а – модель с непосредственным обращением к полевой модели; б – модель с предварительным расчетом матриц потокосцеплений; 1 – расчетные данные; 2 – опытные данные

Для повышения быстродействия описанных моделей были разработаны алгоритмы их реализации на кластерных системах. В случае использования модели с прямым обращением к полевому расчету распараллеливание производится на этапе вычисления элементов матрицы \mathbf{L} , поскольку в рамках одной итерации отдельные расчеты поля методом конечных элементов могут проводиться независимо и в любом порядке. Для достижения максимальной производительности количество участвующих в расчете элементов кластера в этом случае должно быть равно количеству контуров с током плюс два (для расчета приращения по углу поворота ротора и координации процесса расчета в рамках итерации). В модели с предварительным расчетом матриц потокосцеплений технология параллельных вычислений используется на этапе предварительного сбора данных. При этом количество элементов кластера, которые могут участвовать в расчете, не ограничено.

Четвёртая глава посвящена разработке структуры и подсистем САПР АД. Основные подсистемы САПР АД показаны на рис. 5.

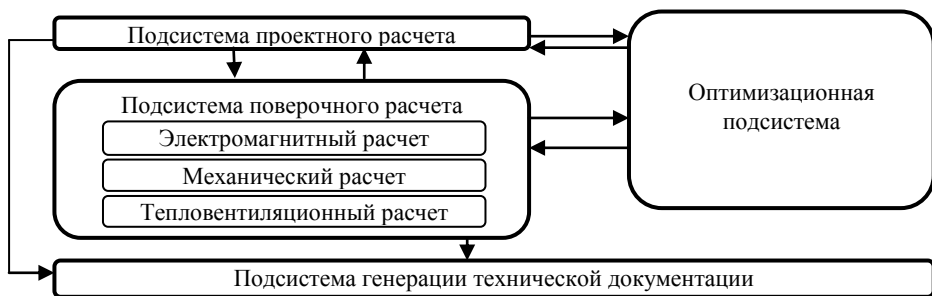


Рис. 5. Подсистемы САПР АД

Созданный в рамках данной работы математический аппарат был использован для создания подсистемы поверочного расчета САПР. В настоящее время большое распространение получают программные продукты, обладающие широкими интерфейсными возможностями, а также встроенной средой программирования. К данным продуктам относится программа Microsoft Excel, имеющая встроенный язык программирования Visual Basic. Она была выбрана в качестве основы для создаваемых средств САПР.

Для использования созданной динамической модели необходимо сформировать модель проектируемого двигателя в терминах библиотеки. Часто исследователю требуется сгенерировать множество однотипных моделей, отличающихся друг от друга различными параметрическими особенностями (габариты, количество пазов и т.п.). Для решения таких задач эффективнее всего использовать параметрические генераторы моделей. В рамках данной работы была разработана система параметрической генерации конечно-элементных моделей асинхронных машин на базе Excel. Параметрический генератор конечно-элементной модели представляет собой программу, позволяющую по заданному набору входных параметров построить полевую модель проектируемого устройства. Параметры, подаваемые на вход генератора, описывают геометрию магнитной системы устройства, и определяются в ходе проектного расчета. Помимо создания узкопрофильного параметрического генератора, внимание было уделено разработке общих механизмов, позволяющих преобразовывать созданный генератор моделей асинхронных машин малой и средней мощности в генератор любого электромеханического устройства осевой конструкции. Некоторые входные параметры и графическое представление результатов работы параметрического генератора приведены на рис. 6. Результаты работы генератора (таблица с данными о модели и ее графическое представление) показаны на рис. 7.

Структура разработанной подсистемы поверочного расчета САПР показана на рис. 8. Базовый модуль подсистемы, созданный на основе Microsoft Excel 2007, координирует взаимодействие всех остальных модулей. В этом модуле производится подготовка динамической модели к расчету. Параметрический генератор так же выполнен на базе Microsoft Excel 2007, и для удобства совмещен с ним в одну книгу Excel.

СИСТЕМА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ГЕНЕРАЦИИ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Параметры статора и ротора			Материалы	
Имя	Знач.	Описание	Элемент конструкции	
Da =	0,191	Наружный диаметр статора	Статор	2013
Z1 =	54	Число пазов статора	Ротор	2013
D1 =	0,1318	Внутренний диаметр статора	Вал	Cr3
Z2 =	51	Число пазов ротора		
delta	0,0003	Воздушный зазор		
Тип паза статора	1			
Тип паза ротора	1			
Тип крепления вала	1	1 - без шлица, 2 - со шлицем		
hshv =	0,0039	Диаметр вала		
bshv =	0,0008	Высота шлица вала		
bsh =	0,0005	Ширина шлица вала		
Вуг =	0	Размер ортогонального усечения		
Вуг2 =	0	Размер горизонтального усечения		
Триангулировать Вал	2	1 - Да, 2 - Нет		
Паз ротора разбивать на	7			
Пне разбивать паз ротора	1	1 - Разбивать, 2 - не разбивать		
Секции ротора на 1 паз	1	1 - Да, 2 - Нет		
kd	0,1	Расчетная длина машины		
Параметры пазов статора			Параметры пазов ротора	
1	Трапециевидный паз		1	Овальный паз

Имя	Знач.	Описание
hsh =	0,0005	Высота шлица
bsh =	0,0003	Ширина шлица
hp =	0,0161	Высота паза
r2 =	0,0005	Ширина паза в широком месте
b1 =	0,004	Ширина паза в узком месте
beta =	0,785	Угол наклона стороны нижней трапеции
alpha =	0,785	Угол наклона трапециевидного паза

Имя	Знач.	Описание
hsh =	0,0008	Высота шлица
bsh =	0,0015	Ширина шлица
hp =	0,0189	Высота паза
r1 =	0,0024	Радиус верхней окружности
r2 =	0,0014	Радиус нижней окружности
1		Шлица на роторе нет (1 - есть, 2 - нет)

Рис. 6. Входные параметры параметрического генератора

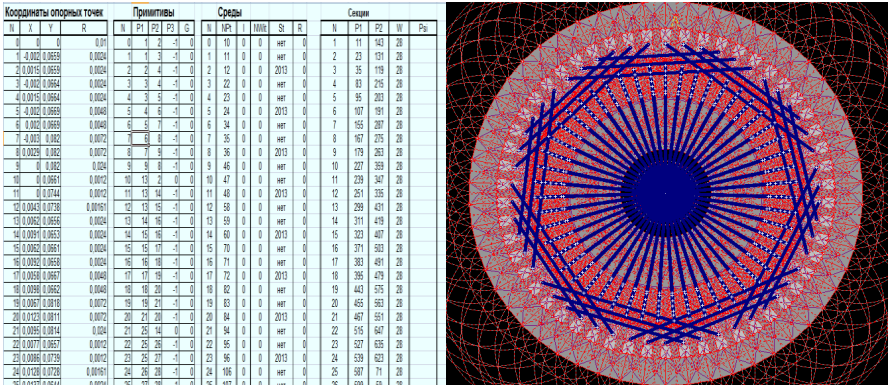


Рис. 7. Результат работы параметрического генератора

Модуль динамического расчета, реализованный в виде отдельной библиотеки AD_SLVR.dll, выполняет расчет двигателя с использованием комбинированной динамической модели. Модуль обработки данных служит для сбора данных расчета и представления их в удобном для пользователя виде.

Одним из главных отличий разработанной подсистемы от существующих является наличие модуля сбора данных для ускоренной модели. Этот модуль обеспечивает базу для создания новой подсистемы САПР – подсистемы генерации быстродействующей модели АД.

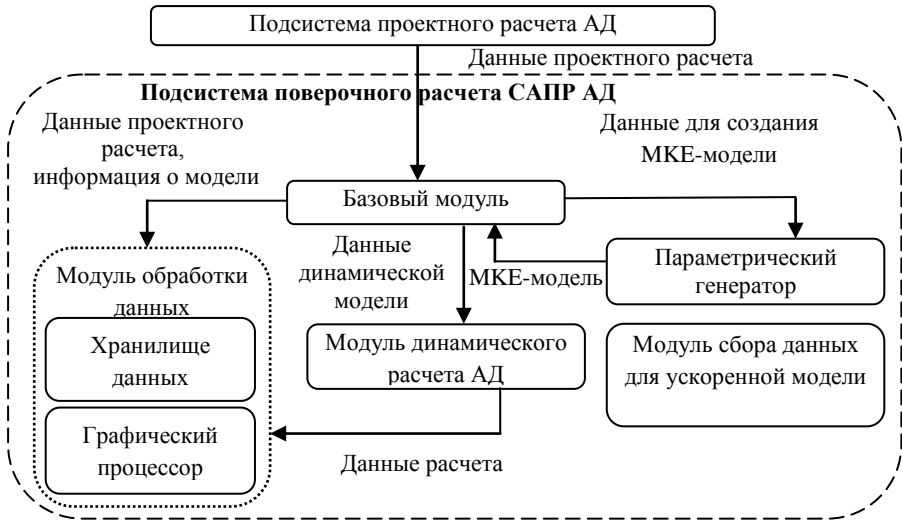


Рис. 8. Подсистема поверочного расчета САПР АД

Целью разработки этого модуля было создание механизма формирования быстродействующей динамической модели АД, обладающей достоинствами численных моделей на основе метода конечных элементов. Для этого была использована модель с предварительным расчетом матриц потокосцеплений. Зависимости $\Psi_i = f(F_{xS}, F_{yS}, F_{xR}, F_{yR}, \alpha)$ для каждой обмотки собираются с использованием подсистемы поверочного расчета.

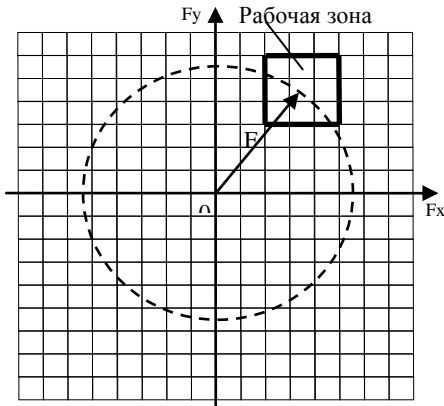


Рис. 9. Сокращение объема используемых данных.

Массив данных, из которых формируются сплайны, может быть очень велик. Для сокращения объема данных, используемых в каждый момент времени, могут быть использованы сплайны, построенные на основе малой части полученных в ходе предварительного расчета данных (рис. 9). При этом модель должна автоматически смещать границы рабочей зоны в случае приближения к ним рабочей точки. Это обеспечивает высокое быстродействие модели без потери точности.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Математический аппарат полевой динамической модели асинхронной машины, основанный на использовании результатов конечно-элементного расчета магнитного поля при расчете разветвленной электрической схемы замещения машины.

2. Метод моделирования динамических режимов в асинхронной машине с короткозамкнутым ротором, основанный на использовании результатов расчета магнитного поля при формировании и решении системы уравнений, описывающих динамические режимы АД.

3. Модифицированная платформонезависимая библиотека конечно-элементного моделирования магнитного поля.

4. Алгоритм распараллеливания и реализации на кластерной системе комбинированной модели динамических режимов в асинхронной машине с короткозамкнутым ротором.

5. Расширяемая версия универсального параметрического генератора конечно-элементной модели асинхронного двигателя с разными по форме пазами на статоре и роторе.

6. Расчетная подсистема системы автоматизированного проектирования асинхронных машин, основанная на разработанном методе моделирования динамических режимов.

7. Подсистема генерации быстродействующих моделей асинхронных машин, основанная на разработанном методе моделирования динамических режимов с предварительным сбором данных.

Публикации по теме диссертации

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

1. Булатов, Л. Н. Разработка динамической модели асинхронной машины с использованием результатов конечно-элементного расчета / Л. Н. Булатов, А. И. Тихонов // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 4. – С. 32-34.
2. Булатов, Л. Н. Динамическая модель асинхронной машины с прямым обращением к конечно-элементной модели магнитного поля / Л. Н. Булатов, А. И. Тихонов // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 1. – С. 40-44.

Публикации в других изданиях

1. Булатов, Л. Н. Разработка кластерной полевой динамической модели асинхронного двигателя / Л. Н. Булатов, А. И. Тихонов, Д. В. Руб-

- цов // Энергия 2008: тез. докл. региональной науч.-техн. конф. студентов и аспирантов / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2008. – С. 24–25.
2. Булатов, Л. Н. Разработка независимой библиотеки конечно-элементного моделирования / Л. Н. Булатов, А. И. Тихонов // Энергия 2009: тез. докл. региональной науч.-техн. конф. студентов и аспирантов / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2009. – Т. 2. – С. 25–26.
 3. Тихонов, А. И. Моделирование эффекта вытеснения тока в пазах ротора асинхронного двигателя при пуске с использованием многопроцессорной техники / А. И. Тихонов, Л. Н. Булатов // Тезисы докл. междунар. науч.-техн. конф. (XV Бенардосовские чтения) / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2009. – С. 24–25.
 4. Булатов, Л. Н. Разработка кластерной полевой модели асинхронного двигателя / Л. Н. Булатов, А. И. Тихонов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тез. докл. XV междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – М.: МЭИ, 2009. – Т. 2. – С. 10–11.
 5. Булатов, Л. Н. Динамическая модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором / Л. Н. Булатов, А. И. Тихонов // Вестник научно-промышленного общества. – М.: Алев-В, 2011. – Вып. 1. – С. 35–40.
 6. Булатов, Л. Н. Комбинированная динамическая модель асинхронного двигателя / Л. Н. Булатов, А. И. Тихонов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тез. докл. XVII междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – М.: МЭИ, 2011. – Т. 2. – С. 7–8.
 7. Булатов, Л. Н. Варианты модели расчета переходных процессов в асинхронной машине с обращением к расчету поля / Л. Н. Булатов // Тезисы докл. междунар. науч.-техн. конф. (XVI Бенардосовские чтения) / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2011. – Т. 3 – С. 148–151.
 8. Булатов, Л. Н. Динамическая модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором / Л. Н. Булатов, А. И. Тихонов // Инновационные проекты молодых ученых за 2010 г.: сб. отчетов / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2011. – С. 135–140.
 9. Булатов, Л. Н. Динамическое моделирование асинхронного двигателя машин с использованием конечно-элементного расчета / Л. Н. Булатов // Инновационные проекты молодых ученых за 2011 г.: сб. отчетов / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2012. – Т.2 – С. 66–73.
 10. Булатов, Л. Н. Оптимизация комбинированной динамической модели асинхронной машины / Л. Н. Булатов, А. И. Тихонов // Энергия 2012: тез. докл. региональной науч.-техн. конф. студентов и аспирантов / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2012. – Т. 4. – С. 66–71.

11. Булатов, Л. Н. Расчет пуска асинхронного двигателя с прямым обращением к конечно-элементной модели магнитного поля / Л. Н. Булатов, А. И. Тихонов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тез. докл. XIX междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – М.: МЭИ, 2013. – Т. 2. – С. 141.

Свидетельства на программные продукты

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Платформонезависимая библиотека конечно-элементного моделирования магнитного поля / А. И. Тихонов, Л. Н. Булатов. – № 2011614852; 22.06.2011. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа расчета динамических режимов асинхронной машины с учетом эффекта вытеснения тока в пазах ротора с непосредственным обращением к библиотеке конечно-элементного расчета поля / А. И. Тихонов, Л. Н. Булатов. – № 2011615132; 30.06.2011. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.

БУЛАТОВ Леонид Николаевич

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АСИНХРОННЫХ МАШИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛЕВЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 20.05.2013г. Формат 60x84¹/₁₆

Печать плоская. Усл.печ.л.1.16.

Тираж 100 экз. Заказ № 112.

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина»

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34