

УДК 681.3.06

## ТЕХНОЛОГИЯ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИБЛИОТЕКИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

ТИХОНОВ А.И., канд. техн. наук, КУЧЕРОВ С.Ю., ЛАШМАНОВ И.М., РУБЦОВ Д.В., инженеры

**Рассмотрена технология численного эксперимента, основанная на использовании трех компонентов: конечно-элементной модели магнитного поля, виртуального лабораторного стенда и системы декларативного программирования.**

*Ключевые слова:* конечно-элементное моделирование магнитного поля, численный эксперимент, полевая модель.

## THE TECHNOLOGY OF ELECTRICAL MASHINES NUMERICAL RESEARCH USING THE LIBRARY OF FINITE-ELEMENT SIMULATION OF MAGNETIC FIELD

A.I. Tikhonov, Ph.D., S.Y. Kucherov, engineer, I.M. Lashmanov, engineer, D.V. Rubtsov, engineer

**This work is devoted to the technology of numerical experiment, based on the three components using: finite-element simulator of magnetic field, virtual laboratory panel and declarative programming system.**

*Key words:* finite-element simulation of magnetic field, numerical experiment, field simulator.

Электромеханические устройства являются основными источниками и потребителями электроэнергии. Поэтому одной из задач автоматизированного проектирования данных устройств является поиск новых вариантов конструкции, апробированные инженерные методики расчета которых иногда отсутствуют. Особенно актуально это в условиях современного рынка, когда возрастает спрос на мелкие партии и даже штучные экземпляры устройств, рассчитанных на конкретные специфические условия эксплуатации.

Для решения задач анализа и синтеза электромеханических устройств используются методы математического моделирования, основанные, в частности, на теории поля, теории цепей и теории нелинейного программирования. Традиционными для инженерных методик проектирования являются модели, построенные на основе теории цепей. Исследовательские задачи решаются, как правило, в полевой постановке. Особенно важно знать картину магнитного поля, из которой можно определить характеристики машины с учетом особенностей конструкции ее магнитной системы. Поиск вариантов с требуемыми характеристиками осуществляется методами нелинейного программирования. Причем современные компьютерные средства и технологии программирования позволяют организовать расчет в форме численного эксперимента, являющегося имитацией реальных процессов.

В силу сложности полевых моделей, они используются, в основном, в НИИ и вузах, обладающих высоко квалифицированными кадрами. Поэтому актуальной является проблема разработки тех-

нологии численного эксперимента, позволяющей существенно упростить процедуру формализации и решения задач анализа и синтеза электромеханических устройств с использованием результатов полевых расчетов и расширить тем самым область применения современных моделей в сфере производства и ремонта этих устройств.

Традиционно системы моделирования физических полей функционируют как самостоятельные автономные объекты. Для проведения широкомащтабного численного эксперимента следует объединить возможности различных моделей, что связано, как правило, с существенными трудностями.

Особенность разработанной технологии численного эксперимента состоит в том, что она опирается на открытые компоненты, каждый из которых обеспечивает формирование и функционирование определенной математической модели устройства, в частности, конечно-элементной модели магнитного поля, модели электрической и кинематической цепи, а также поисковой модели, реализующей математический аппарат поиска оптимального решения.

Традиционно внутренние функции автономных систем отделены от пользователя интерфейсным окном, через которое, собственно, осуществляется взаимодействие системы с пользователем (рис. 1). Иногда пользователь может получить доступ к внутренним функциям с помощью встроенных языков программирования. Тем не менее сама система при этом продолжает играть роль базовой среды, в которой функционируют приложения пользователя, обращающиеся к внутрисистемным функциям.

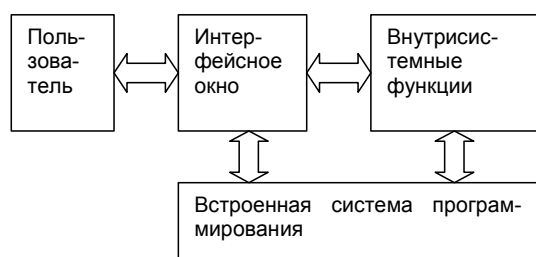


Рис. 1. Схема функционирования автономных систем моделирования

Принципиально иная идея реализована при создании компонентов системы математического моделирования электромеханических устройств (СММ ЭМУ) [1]. Главное отличие компонентов состоит в том, что они как бы «вывернуты наизнанку» (рис. 2) и контактируют с пользователем именно через функции, которые каждый компонент открыто ему предоставляет. В качестве базового приложения, в котором реализуется алгоритм взаимодействия компонентов, может выступать какая-либо среда программирования или математический процессор. Это обеспечивает компонентам мобильность, состоящую в способности интегрироваться в другие приложения, поставляя в них свой математический аппарат и визуальные интерактивные средства, оставаясь компактными и автономными, то есть не зависящими от базовой системы.

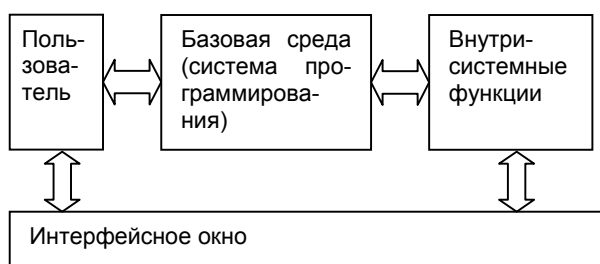


Рис. 2. Схема функционирования компонентов СММ ЭМУ

К достоинствам компонентной организации СММ ЭМУ можно отнести следующее:

- 1) принятая в Windows компонентная модель (СОМ) позволяет последовательно создавать новые компоненты и развивать математический аппарат существующих компонентов независимыми разработчиками, не нарушая целостности системы;
- 2) проектировщик может по своему усмотрению компоновать рабочее место из доступных ему или созданных им лично компонентов;
- 3) открытость и объектная организация компонентов позволяет создавать изначально не предполагававшиеся комбинированные модели устройств.

Учитывая принцип преемственности, в качестве базовой среды для организации СММ ЭМУ целесообразно использовать один из популярных открытых математических процессоров, таких, как MatLab, MathCad или Excel. В среду процессора интегрируются три компонента, взаимодействующие между собой и с базовой средой: система декларативного программирования (поисковая модель) [2, 7]; система моделирования поля [5] и виртуальный лабораторный стенд [3, 6] для имитации динамических режимов. Каждый компонент поставляется в вызывающее его приложение методы построения соответствующих моделей и управления численным экспериментом, а также автономное окно для визуализации соответствующей модели и работы с ней в интерактивном режиме. Это позволяет адаптировать математический процессор для решения задач электромеханики.

СММ ЭМУ является рабочим инструментом исследователя. Ее назначение в том, чтобы быть инструментом не только для разработки новых технических устройств, но и для исследования физических процессов, происходящих в этих устройствах, поиска принципиально новых решений.

Типовая программа численного эксперимента включает в себя (рис. 3):

- 1) расчет устройства;
- 2) параметрическую генерацию полевой модели устройства;
- 3) исследование полевой модели устройства с целью выявления путей совершенствования его конструкции;
- 4) оптимизацию конструкции устройства в соответствии с заданной функцией цели;
- 5) формирование и исследование динамической модели спроектированного устройства с использованием результатов моделирования магнитного поля.

Расчет устройства осуществляется системой автоматизированного проектирования, для разработки которой используются средства программирования базового математического процессора. Параметрический генератор полевой модели представляет собой программный код, осуществляющий автоматическое формирование модели в соответствии с заданным алгоритмом с использованием функций компонента моделирования магнитного поля. Другие функции этого же компонента могут быть использованы для формирования программы численных исследований полевой модели. Всевозможные деформации полевой модели могут быть исследованы и в интерактивном режиме с использованием визуальных средств компонента.

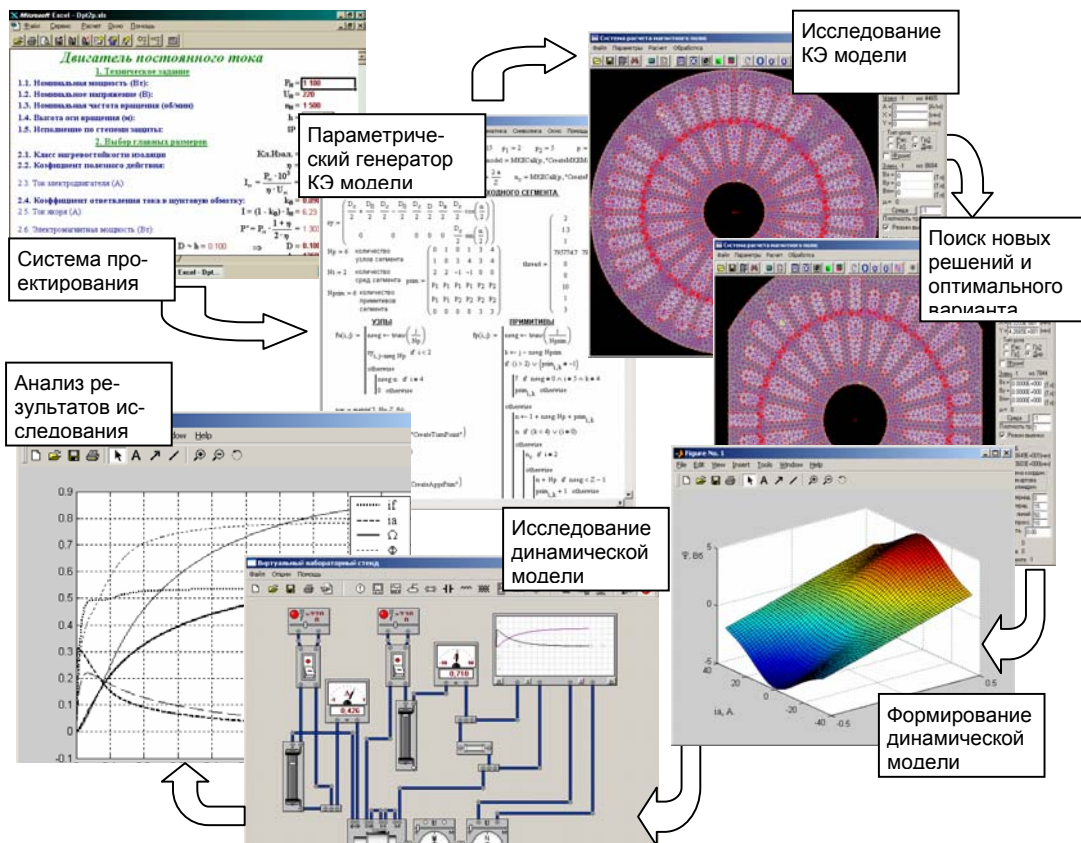


Рис. 3. Типовая программа численного эксперимента

Поиск оптимального решения с использованием параметрически формируемой полевой модели может быть осуществлен средствами нелинейного программирования базового математического процессора или с помощью компонента декларативного программирования, позволяющего осуществить гибкую формализацию и решение достаточно сложных поисковых задач. Результатом поиска может стать вариант конструкции устройства, имеющий нетрадиционную магнитную систему. Для исследования такого устройства в динамике может быть использован компонент, визуально представленный в форме виртуального лабораторного стенда, с помощью которого можно собрать достаточно сложную схему испытаний. Испытание проводится в форме имитации реального эксперимента. Для определения параметров динамической модели устройства используются результаты расчета магнитного поля.

С помощью СММ ЭМУ было осуществлен, в частности, поиск новых решений неявнополюсного двигателя постоянного тока и торцевого вентильного ветрогенератора.

#### Список литературы

1. Тихонов А.И. Интегрированная исследовательская среда математического моделирования электромеханических устройств // Вестник научно-промышленного общества. – М.: «Алев-В», 2005. – Вып. 9. – С. 55–59.
2. Кучеров С.Ю., Тихонов А.И. Поисковое проектирование электромеханических устройств // Вестник научно-промышленного общества. – М.: «Алев-В», 2005. – Вып. 9. – С. 102–108.
3. Лашманов И.М., Тихонов А.И. Исследование динамических режимов неявнополюсных машин постоянного тока с использованием результатов расчета магнитного поля // Вестник научно-промышленного общества. – М.: «Алев-В», 2005. – Вып. 9. – С. 88–94.
4. Шишкин В.П., Тихонов А.И., Рубцов Д.В. Поиск оптимальной конструкции торцевого ветрогенератора с использованием динамической полевой модели // Вестник ИГЭУ. – 2005. – Вып. 3. – С. 43–47.
5. Тихонов А.И. Библиотека конечно-элементного моделирования магнитного поля. – М.: ВНИИЦ, 2006. – №50200600161.
6. Тихонов А.И., Лашманов И.М. Виртуальный лабораторный стенд. – М.: ВНИИЦ, 2006. – №50200600162.
7. Тихонов А.И., Кучеров С.Ю. Система декларативного проектирования электрических машин. – М.: ВНИИЦ, 2006. – №50200600163.

*Тихонов Андрей Ильич,*  
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики,  
телефон (4932) 26-99-28,  
e-mail: admin@fizika.ispu.ru

*Кучеров Святослав Юрьевич,*  
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
инженер кафедры электромеханики,  
телефон (4932) 26-97-04,  
e-mail: elmash@em.ispu.ru

*Лашманов Иван Михайлович,*  
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
инженер кафедры электромеханики,  
телефон (4932) 26-97-04,  
e-mail: elmash@em.ispu.ru

*Рубцов Дмитрий Валерьевич,*  
«Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
инженер кафедры электромеханики,  
телефон (4932) 26-97-04,  
e-mail: elmash@em.ispu.ru