

7. Патент на полезную модель №107421. Фазоповоротное устройство от 08.04.2011.

8. Патент на полезную модель №2450420. Полупроводниковое фазоповоротное устройство от 13.05.2011.

9. Патент на полезную модель №110558. Полупроводниковое фазоповоротное устройство от 08.06.2011.

10. Рашитов П.А., Ремизевич Т.В. Анализ режимов коммутации тиристорного моста переменного тока в среде PSpice. — Силовая электроника, 2010, № 3.

11. Ремизевич Т., Рашитов П. Особенности управления полупроводниковым ФПУ со средней точкой. — Силовая электроника, 2011, № 1.

12. Новиков М.А., Панфилов Д.И., Ремизевич Т.В., Рашитов П.А. Анализ процессов одновременной коммутации тиристорных мостов в преобразователях с многообмоточными трансформаторами. — Электричество, 2013, № 5.

13. Патент на полезную модель №122814 Система управления поэтапным переключением обмоток шунтового трансформатора фазоповоротного устройства и фазоповоротное устройство с такой системой управления от 09.06.2012.

[25.04.13]

*Авторы: Асташев Михаил Георгиевич окончил факультет электронной техники (ЭТФ) Московского энергетического института (МЭИ) в 2006 г. В 2010 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка и исследование преобразователей для вентиляно-индукторных двигателей с конфигурируемыми обмотками». Заведующий лабораторией преобразовательной техники им. К.А. Круга ОАО «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского».*

*Панфилов Дмитрий Иванович окончил ЭТФ МЭИ в 1971 г. В 1999 г. защитил докторскую диссертацию «Программно-аппаратные средства построения систем управления объектами промышленной электроники». Заместитель генерального директора по науке ОАО «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского», заведующий кафедрой промышленной электроники НИУ «МЭИ».*

## Современная учебно-исследовательская лаборатория теории электромагнитного поля

БУТЫРИН П.А., ШАКИРЗЯНОВ Ф.Н.

*Рассмотрены проблемы создания современной универсальной учебно-исследовательской лаборатории электромагнитного поля, решающие главную образовательную задачу — слияние процесса получения знаний с наукой и практикой. Указаны темы учебных и исследовательских работ, которые могут быть выполнены на стендах лаборатории. Опыт проведения таких работ подтвердил их эффективность и большую отдачу в учебной и научной деятельности.*

**Ключевые слова:** лаборатория теории электромагнитного поля, проблемы создания, учебно-исследовательские работы

Электромагнитное поле — материальный агент, обеспечивающий функционирование электротехнических и электроэнергетических систем, установок и устройств, и поэтому глубина знаний в области теории поля, а также овладение практикой их применения определяют фундаментальность подготовки и уровень квалификации инженера и научного работника в области электротехники и электроэнергетики. Освоение в полном объеме современной учебной литературы по теории электромагнитного поля [1] и практикой, в том числе компьютерной, решения расчетных задач [2] позволяет приобрести хорошую базу знаний и умений в области математических моделей поля. Иное дело, знания, а особенно умения, необходимые при работе с реальными физическими электромагнитными полями, которые могут быть получены в вузовских лабораториях. Эти лаборатории — область не-

*Problems concerned with development of a modern universal education and research laboratory of electromagnetic field are considered. The aim of such a laboratory is to solve the main education objective that consists in integrating the process of gaining knowledge with scientific work and practical applications. The topics of educational and research works that can be carried out on the laboratory setups are indicated. Experience gained from carrying out such works has confirmed their efficiency and high usefulness for educational and scientific activities.*

**Key words:** laboratory of electromagnetic field theory, development problems, education and research works

благополучия современного высшего электротехнического образования, поскольку только единичные вузы располагают достаточно полноценными лабораториями теории поля.

Рассмотрим эту ситуацию подробнее. Классическая и одна из лучших на постсоветском пространстве лаборатория теории поля кафедры ТОЭ Санкт-Петербургского государственного политехнического университета [3] представляет собой ряд столов с расположенными на них установками и устройствами, причем каждый такой стол предназначен для выполнения в основном одной работы. Первоначально часть установок создавалась для учебно-демонстрационных целей, а часть — для выполнения научно-исследовательских работ (НИР). Наличие последней части дает возможность проводить в такой лаборатории научно-исследовательские работы, в том числе со студентами, и по-

звояет отнести ее к лабораториям учебно-исследовательского типа, что важно для современного вуза. Лаборатории подобного типа создавались в течение длительного времени; они отражают специфический путь развития кафедры, оснащены приборами и установками разного времени, поэтому их тиражирование затруднено. Но, главное, подобные лаборатории требуют нефронтального ведения занятий, усложняя организацию учебного процесса. Следует заметить, что универсальных промышленно изготовленных лабораторий по теории поля, таких как лаборатории по теории электрических цепей, ранее не было.

Целью настоящей статьи является определение требований к созданию вузовской лаборатории по теории поля и описание ее реализации в Московском энергетическом институте на кафедре теоретических основ электротехники.

Современные тенденции синтеза передовой науки, производства и бизнеса, породившие феномен технауки [4], ставят перед образованием целый ряд новых задач, главная из которых – слияние процесса получения знаний с наукой и практикой на основе прорывных технологий: информационных, когнитивных и т.д. В этой связи лаборатория теории электромагнитного поля должна изначально создаваться как учебно-исследовательская и максимально оснащенная информационно-компьютерными системами. Кроме того, она должна обеспечивать проведение фронтальных занятий в комфортных условиях, когда лабораторная работа выполняется студентами в составе небольших бригад (2–3 чел.), а разнообразие самих работ обеспечивает изучение электромагнитного поля и его составляющих в широком диапазоне их проявлений применительно к актуальной науч-

но-инженерной проблематике на самом современном оборудовании, с максимальным использованием информационных технологий и доступностью для открытого образования, т.е. демонстрации работ в удаленном доступе.

Рассмотрим, как подобные требования реализованы в лаборатории, состоящей из разработанных в МЭИ учебных стендов. Но вначале заметим, что выбор конструкции стендов, места их изготовления диктовались не только техническими, но и экономическими соображениями. В результате удалось ограничить стоимость одного стенда суммой в 250 тыс. рублей. При размещении заказов в Москве или зарубежом стоимость стендов была бы в три-четыре раза дороже, поэтому стенды изготавливались в НПП «Учебная техника-Профи» (г. Челябинск), имеющем большой опыт по изготовлению разнообразной учебной техники. Установленные в залах учебно-исследовательской лаборатории кафедры ТОЭ МЭИ 24 стенда обеспечивают фронтальное выполнение более 10 лабораторных работ по всем разделам теории электромагнитного поля одновременно в двух академических группах.

Стенд на рис. 1 представляет собой стол со стойкой специальной конструкции и встроенными блоками, обеспечивающими создание и индикацию электрических и магнитных полей в различных системах электродов и устройствах. Часть блоков, необходимых для проведения ряда работ, хранится отдельно и устанавливается на стенд при подготовке к занятиям. На рис. 1 на таком стенде собрана установка для проведения работы «Исследование поля трехжильного силового кабеля», а рядом расположен блок с целым набором конструкций для создания других лабораторных установок (в увеличенном виде он представлен на рис. 2).

Блок на рис. 2 содержит необходимые комплектующие для проведения цикла работ по исследованию статических и стационарных полей. На стенде

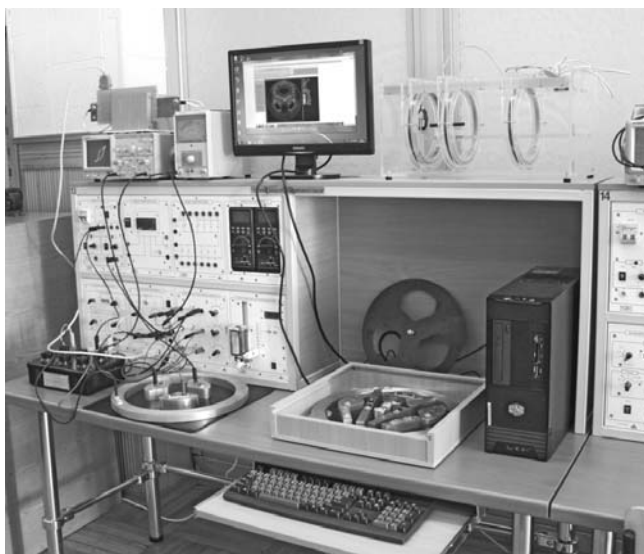


Рис. 1. Универсальный стенд для физического и машинного моделирования электромагнитных полей

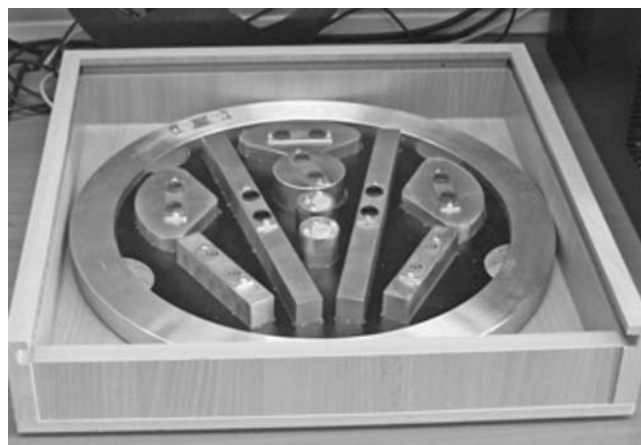


Рис. 2. Комплект электродов для физического моделирования статических, стационарных и квазистационарных полей

расположены также измерительные приборы, программно-вычислительный комплекс, позволяющий осуществлять машинное моделирование электромагнитных полей всех физически исследуемых в каждой лабораторной работе объектов. При выполнении конкретной работы студенты проводят аналитическое исследование (если оно возможно) объекта изучения, исследуют его физическую и машинную модели, сопоставляют результаты всех видов исследования. При численном моделировании электромагнитных полей используются лицензионные современные варианты программ ELCUT, ANSYS.

Каждые шесть компьютеризированных рабочих мест студентов контролируются сервером на рабочем месте преподавателя (таких мест в лаборатории четыре). Все рабочие места, а также имеющаяся в лаборатории интерактивная доска объединены в локальную сеть кафедры, которая, кроме рабочих мест студентов и преподавателей в лаборатории электромагнитного поля, включает локальные сети лаборатории электрических цепей (25 компьютеров), лаборатории компьютерных технологий электротехники (20 компьютеров), лекционную аудиторию, рабочие компьютеры научно-исследовательских групп.

Локальная сеть кафедры подключена к общеуниверситетской сети. Все кафедральные ЭВМ имеют доступ к системе высокопроизводительного университетского программно-вычислительного комплекса, которой предоставляются услуги SaaS (Software as a Service). Таким образом, кафедральные ЭВМ могут работать в режиме виртуальных машин с потенциалами общеуниверситетского комплекса.

Возможности учебно-исследовательской лаборатории электромагнитного поля постоянно расширяются. В настоящее время на оборудовании стендов выполняются работы:

1. Установившиеся режимы длинной линии.
2. Исследование динамических петель гистерезиса магнитных материалов.
3. Исследование поля и емкости коаксиального кабеля.
4. Исследование полей и частичных емкостей системы заряженных тел: а) поле трехжильного силового кабеля; б) поле двухпроводной воздушной линии; в) поле трехпроводной воздушной линии.
5. Возмущение однородного поля цилиндрическим телом.
6. Распределение тока в плоской шине произвольной формы.
7. Моделирование магнитного поля электрической машины полем тока в проводящем листе.



Рис. 3. Стенд для исследования режимов микроволновых линий передачи

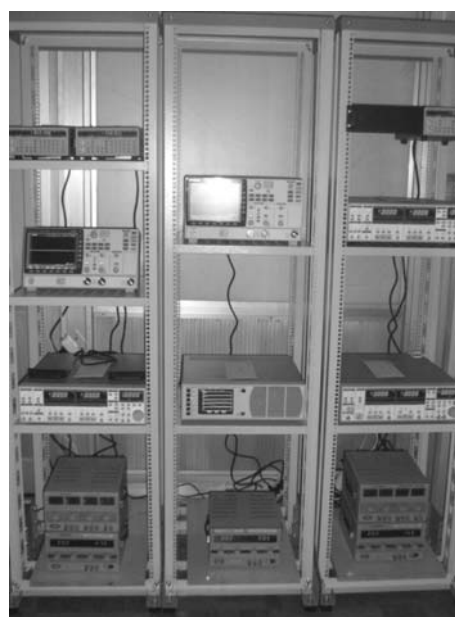


Рис. 4. Приборный комплекс для измерения динамической магнитной восприимчивости магнитных материалов

8. Магнитное поле системы контуров с током. Экспериментальная проверка закона полного тока.
9. Исследование механического проявления магнитного поля.
10. Синтез магнитного поля с заданным распределением его напряженности.
11. Намагничивание тел произвольной формы.
12. Исследование поверхностного эффекта в плоской шине, расположенной в пазу ферромагнитного тела.
13. Исследование эффекта близости.

В учебный план студенческих групп лабораторные работы отбираются с учетом профиля обучения.

В лаборатории имеется также ряд стендов (рис. 3 и 4), на которых возможно проведение учебно-исследовательских работ по желанию студентов, например, исследование режимов коакси-

альных и волноводных линий при различных нагрузках; измерение комплексных диэлектрических и магнитных проницаемостей материалов; измерение характеристик заземлителей; исследование вольт-амперных характеристик высокотемпературных сверхпроводящих компонентов в продольных и поперечных магнитных полях и т.д.

В лаборатории установлены современные измерительные приборы и комплексы, позволяющие проведение научных исследований параметров электротехнических материалов и устройств: приборный комплекс для измерения динамической магнитной восприимчивости магнитных материалов; векторный анализатор цепей в диапазоне частот от 200 кГц до 8 ГГц; панорамный измеритель коэффициента стоячей волны от 2 до 18 ГГц; векторный анализатор цепей в диапазоне частот от 0 до 40 ГГц.

Опыт проведения учебных, учебно- и научно-исследовательских работ в созданной на кафедре ТОЭ МЭИ лаборатории по теории электромагнитного поля подтвердил большую отдачу от этих работ в учебной и научной областях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники. 4-е изд., т. 3. — М.: Питер, 2003.

2. Сборник задач по теоретическим основам электротехники, т. 2. Учебное пособие/Под ред. П.А. Бутырина. — М.: Издательский дом МЭИ, 2012.

3. Нейман Л.Р., Демирчян К.С., Юринов В.М. Руководство к лаборатории электромагнитного поля. 3-е изд. — М.: Высшая школа, 1966.

4. Андреев А.Л., Бутырин П.А. Технонаука как социальный инновационный проект. — М.: Вестник РАН 2011, № 3, с. 197–203.

[27.05.13]

*А в т о р ы : Бутырин Павел Анфимович окончил энергетический факультет Челябинского политехнического института в 1974 г. В 1994 г. защитил докторскую диссертацию «Разработка аналитических и численно-аналитических методов решения уравнений состояния электрических цепей» в Московском энергетическом институте (МЭИ). Заведующий кафедрой теоретических основ электротехники МЭИ, член-корр. РАН.*

*Шакирзянов Феликс Нигматзянович окончил Уральский политехнический институт в 1963 г. Защитил кандидатскую диссертацию «Исследование ферритового преобразователя в режиме нелинейного ферромагнитного резонанса» в 1970 г. в МЭИ. Профессор кафедры теоретических основ электротехники МЭИ (ТУ).*