

На правах рукописи

КИЯТКИН Родион Петрович

ПОСТРОЕНИЕ СХЕМНЫХ МОДЕЛЕЙ
ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ РАСЧЕТОВ
ТОКОВЕДУЩИХ СИСТЕМ, ЭКРАНОВ И ВОЛНОВОДОВ

Специальность 05.09.05 – Теоретическая электротехника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2005

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Научный консультант:

доктор технических наук,
профессор
Шакиров Мансур Акмелович.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор
Бычков Юрий Александрович;

доктор технических наук,
профессор
Ким Константин Константинович;

доктор технических наук,
профессор
Шнеерсон Герман Абрамович.

Ведущая организация:

Институт электрофизики и электроэнергетики РАН
(г. Санкт-Петербург).

Защита состоится «25» ноября 2005 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.16 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, Главное здание, ауд. 284.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «24» октября 2005 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
канд. техн. наук, доцент

Журавлева Н.М.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Научно-технический прогресс в различных областях электротехники в значительной мере связан с совершенствованием конструкций электротехнических устройств, базирующемся на расчете электромагнитных полей (ЭМП) в этих устройствах. Цель электромагнитных расчетов, выполняемых при проектировании, состоит в определении параметров конструкций, обеспечивающих соблюдение заданных требований к дифференциальным и интегральным характеристикам ЭМП в элементах создаваемых устройств.

Детальное исследование особенностей распределения ЭМП в конструктивных элементах, имеющих сложные конфигурации, невозможно без численных расчетов полей с использованием вычислительной техники. К настоящему времени создан целый ряд численно-аналитических и численных методов анализа ЭМП: методы интегральных уравнений (МИУ), конечных разностей (МКР), конечных элементов (МКЭ) и граничных элементов (МГЭ); методы сведений полевых задач к цепным; методы физического моделирования ЭМП с использованием специально построенных численно-аналоговых комплексов; декомпозиционные методы. Разработка различных расчетных методов обусловлена большим разнообразием практических задач. Применение для их решения какого-то единого численного метода либо малоэффективно, либо просто невозможно, поэтому методы численного расчета ЭМП являются направленными: *каждый из них ориентирован для решения задач определенного типа.*

В связи с этим актуальной проблемой теоретической электротехники является разработка новых и усовершенствование известных алгоритмов расчета ЭМП, что отражено в координационных планах НИР отделения «Электрофизика и электроэнергетика» РАН (в прошлом АН СССР) под названиями: «Развитие теории и методов расчета электромагнитных полей, электрических цепей, переходных процессов в электроэнергетических и электрофизических устройствах» и «Развитие методов физического, математического и численного моделирования процессов в электрофизических и электроэнергетических устройствах». В последние годы разработка новых подходов к составлению математических расчетных моделей для решения задач теории поля координируется Проблемным советом № 1 «Теория и методы расчета электромагнитных полей» Научно-отраслевого отделения № 1 «Теоретическая электротехника» Академии электротехнических наук РФ (РАЭН).

Необходимость развития разделов дисциплины «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ), посвященных теории и методам математического моделирования электромагнитных явлений, подтверждается также анализом материалов Международных симпозиумов и отечественных конференций по теоретической электротехнике. Как правило, особое внимание уделяется методам, позволяющим ускорить электромагнитные расчеты электротехнических устройств при вариации их геометрических и электрофизических параметров, что важно для выполнения оптимизационных расчетов и автоматизации проектирования этих устройств.

Совершенствование существующих и построение новых простых *схемных моделей* (называемых также *схемами замещения*) для расчета ЭМП и электромагнитных характеристик электротехнических устройств особенно привлекательно с точки зрения дальнейшего развития дисциплины ТОЭ, в которой это направление является одним из доминирующих, отличающих ее от других дисциплин. Об этом свидетельствует значительное число диссертаций, монографий и статей, посвященных этой тематике, в том числе работы профессоров кафедры ТОЭ Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (В.Н. Боронин, акад. АН СССР и РАН К.С. Демирчян, Н.В. Коровкин, И.Ф. Кузнецов, акад. АН СССР Л.Р. Нейман, А.Б. Новгородцев, В.Л. Чечурин, М.А. Шакиров, В.М. Юринов), других кафедр СПбГПУ (акад. РАН Я.Б. Данилевич, Э.Г. Кашарский,

Ю.В. Ракитский, Г.А. Шнеерсон и др.) и других вузов (С.М. Аполлонский, В.И. Астахов, чл.-корр. РАН П.А. Бутырин, Ю.А. Бычков, В.Ф. Дмитриков, А.В. Иванов-Смоленский, К.И. Ким, К.К. Ким, Э.В. Колесников, Э.А. Меерович, Л.А. Цейтлин, О.В. Тозони, В.А. Филин, Г.Н. Цицикян и др.), а также работы зарубежных авторов (M.V.K. Chari, H.V. Dwight, R.L. Ferrari, B. Hague, H. Kaden, C.I. Mocanu, P.P. Silvester, M. Stafil, R.L. Stoll, J. Turowski и др.).

Применение схемных моделей весьма эффективно при выполнении инженерных расчетов, что делает их более наглядными и обозримыми. Необходимость *схемного* подхода вытекает из всего опыта развития методов теоретической электротехники при решении практических электротехнических задач, в том числе задач, связанных с расчетом *вихревых токов* в проводящих элементах различных электротехнических устройств и учетом *поверхностного эффекта* в них при определении электромагнитных параметров устройств.

На практике задачи такого рода встречаются при:

- расчете *токоведущих систем* (ТВС) токопроводов и высоковольтных кабельных линий, служащих для передачи энергии многофазными токами большой силы;
- расчете токоведущих частей коммутационных электрических аппаратов, предназначенных для осуществления операций включения, отключения, переключения в электроэнергетических системах с большими номинальными токами и высокими напряжениями;
- расчете *электромагнитных экранов*, в том числе в виде тонких проводящих немагнитных *пластин* и *оболочек*, широко применяемых в современной электротехнике для ослабления переменных электромагнитных полей, создаваемых какими-либо источниками в некоторой области пространства, не содержащей этих источников (выполнение этих расчетов важно для решения ряда задач электромагнитной совместимости и экологии);
- проектировании и создании перспективных высокоскоростных наземных транспортных систем, использующих *магнитную левитацию*;
- анализе *диффузии* ЭМП в проводящие элементы ТВС электрофизических и электротехнологических установок, использующих *сильные импульсные магнитные поля* в физических экспериментах и технологических процессах, среди которых можно выделить *магнитно-импульсную обработку металлов* (МИОМ);
- расчете *волноводов* в виде полых или заполненных диэлектриком металлических труб, применяемых в радиотехнических устройствах для передачи электромагнитной энергии от генератора сигналов к антенне или от антенны к приемнику в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ), в фильтрах для разделения различных каналов связи, усилителях и т. п.

В диссертации рассматриваются эффективные методы решения перечисленных задач. Практическая ценность и актуальность решения первых трех задач вытекает, в частности, из того, что на современных сверхмощных электрических станциях и электротермических установках токопроводы в значительной мере определяют экономические показатели сооружений. При токах в несколько десятков тысяч ампер нерациональная конструкция токопровода может привести к большим потерям электрической энергии, перегреву токонесущих шин и экранов и выходу токопровода из строя. Поэтому вопросы расчета мощных токопроводов с учетом поверхностного эффекта и эффекта близости весьма актуальны.

О важности других из перечисленных задач свидетельствует внимание к ним на ряде недавно прошедших симпозиумов и конференций по теоретической электротехнике, на международных специализированных электротехнических конференциях, в том числе на Конгрессах «ВЭЛК-99» и «ВЭЛК-2005», а также на конференциях по электромагнитной совместимости и экологических симпозиумах, на которых вопросы экранирования обсуждаются постоянно.

Целью работы является разработка и практическое применение новых схемных моделей для эффективного (по скорости и точности) математического моделирования установившихся и переходных электромагнитных процессов в токоведущих системах и проводя-

щих элементах различных электротехнических устройств с целью выявления физических особенностей их работы и усовершенствования их конструкций.

В соответствии с этой целью в диссертации решались следующие задачи.

1. Поиск новых эффективных расчетных моделей и электрических схем замещения многофазных промышленных токопроводов с массивными немагнитными токоведущими шинами и экранами, позволяющих быстро и точно рассчитать любые их характеристики: эквивалентные и вносимые сопротивления, индуктивности, мощности потерь в отдельных частях любых элементов токопроводов и электромагнитные силы, действующие на них в *установившихся режимах*.

2. Создание методики применения схемных моделей для анализа *переходного скин-эффекта* в токоведущих системах, включая системы установок сверхсильных токов для создания импульсных магнитных полей.

3. Разработка методики учета влияния *на электромагнитные процессы в токопроводах* окружающих их экранов с идеализированными электрофизическими свойствами (идеальных магнитных и электромагнитных экранов), основанной на использовании аппарата конформных отображений областей.

4. Исследование возможности применения *закона преобразования электромагнитных сил при конформных отображениях областей* для расчета сил с учетом поверхностного эффекта в проводящих элементах токопроводов с идеальными магнитными и электромагнитными экранами как при *установившихся синусоидальных* режимах работы токопроводов, так и при *переходных процессах* в них.

5. Разработка методики применения построенных схемных моделей токоведущих систем для расчета *электродинамических процессов* в транспортных системах, использующих эффект *магнитной левитации*.

6. Поиск новых расчетных моделей и электрических схем замещения токопроводов с шинами, выполненными из *магнитных материалов* (стали) с постоянными магнитными свойствами, и разработка методики их применения для расчетов *переходного скин-эффекта* в токоведущих системах с идеальными магнитными экранами.

7. Создание схем замещения *тонких немагнитных пластин* и оболочек, используемых в качестве электромагнитных экранов.

8. Поиск *интегральных схем замещения* трубчатых металлических волноводов, используемых для передачи электромагнитной энергии в диапазоне сверхвысоких частот.

9. Реализация разработанных методов электромагнитных расчетов в виде компьютерных программ для внедрения их в инженерную практику и учебный процесс.

Методы исследования основаны на использовании теории ЭМП, теории линейных электрических цепей, элементов теории аналитических функций комплексного переменного и теории матриц, методов вычислительной математики.

Научная новизна работы состоит в следующем.

1. Разработан новый тип схемных моделей ТВС с немагнитными элементами — *верные схемы замещения* для расчета распределения тока в проводящих элементах как в *установившемся* синусоидальном режиме, так и при *переходных* процессах. При этом введены удобные для теории и практики построения схемных моделей новые термины и понятия: *условный элементарный виток (УЭВ)*; *условная индуктивность УЭВ*. Показана возможность использования построенных схемных моделей для расчета токораспределения в массивных шинах токопроводов установок для получения сильных импульсных полей.

2. Создана методика применения аппарата функций комплексного переменного, включая пространственные конформные преобразования, для расчета временных комплексов вихревых токов и пространственных комплексов электромагнитных сил (ЭМС) в ТВС с учетом экранов с идеализированными электрофизическими свойствами в установившемся синусоидальном режиме, а также для расчета мгновенных значений токов в переходных процес-

сах. При этом введено важное для ТОЭ понятие: *бикомплексная напряженность магнитного поля*.

3. Представлена методика расчета сил тяги и левитации в электродинамических транспортных системах с использованием *верных схем замещения* проводящих элементов систем.

4. Разработана методика построения *многоверных схем замещения* ТВС с шинами, выполненными из магнитной стали. Методика проиллюстрирована на примере расчета токораспределения в двухшинном токопроводе в *переходном режиме*.

5. Найденны наглядные *решетчато-полевые модели* тонких немагнитных пластин и оболочек произвольной формы для расчета вихревых токов, возбуждаемых в пластинах и оболочках внешними переменными магнитными полями.

6. Разработаны *диакоптические схемы замещения* для расчета критических параметров полых волноводов в случаях передачи по ним электромагнитной энергии волнами обоих типов: электрическими и магнитными.

7. Представлен алгоритм решения *комплексных* задач электротехники с учетом *диффузии* ЭМП в элементы токоведущей системы при разряде через нее емкостного накопителя (для создания импульсного магнитного поля), в цепь которого могут быть включены любые *схемные* элементы;

8. Решена проблема построения *годографов сил*, действующих на отдельные элементы и группы элементов ТВС в *переходном* режиме работы.

Теоретическая значимость работы. Диссертационная работа является логическим продолжением обширного комплекса исследований по развитию, совершенствованию и обобщению методов теоретической электротехники, заложенных в трудах академика В.Ф. Миткевича, основателя кафедры ТОЭ СПбГПУ, и систематически развиваемых на кафедре под общим руководством заведующих кафедрой профессора П.Л. Калантарова, академиков Л.Р. Неймана и К.С. Демирчяна, профессоров В.М. Юринова и В.Н. Боронина. Полученные в работе результаты, существенно расширяя возможности для решения проблем скин-эффекта в ТВС, в целом являются существенным дополнением к разделу «Переменное электромагнитное поле в проводящей среде» курса ТОЭ, включая такие темы, как *нерезкий* и *резкий* поверхностный эффект, эффект близости, расчет *электромагнитных сил*, электромагнитное экранирование и др. в *установившихся* режимах и *переходных* процессах.

Практическая значимость работы.

1. На основе разработанных в диссертации теории и методов электромагнитного расчета конструктивных элементов электротехнических устройств созданы алгоритмы и комплекс программ, которые могут быть использованы при обосновании проектных решений по конструкциям:

- токоведущих систем различного назначения и электротехнических устройств, составными частями которых они являются;
- тонких электромагнитных экранов, используемых для снижения напряженности магнитного поля до необходимого уровня и достижения электромагнитной совместимости различных технических средств, использующих электромагнитные явления;
- металлических трубчатых волноводов, применяемых в технике СВЧ;
- высокоскоростных наземных транспортных средств левитационного типа.

2. Полученные алгоритмы электромагнитного расчета ТВС с массивными проводящими элементами и соответствующие компьютерные программы позволяют быстро получать совокупность электрических и электромагнитных параметров подавляющего большинства типов современных токопроводов и шинопроводов, применяемых на всех видах электростанций, промышленных предприятиях, строительных и сельскохозяйственных объектах, что является надежной базой при выполнении последующих тепловых и механических рас-

четов, повышая в целом эффективность проектных и опытно-промышленных разработок широкого круга устройств и систем с токопроводами.

Реализация результатов работы.

1. Разработанные в работе методы анализа поверхностного эффекта в ТВС использовались для исследования токораспределения, потерь энергии и распределения электромагнитных сил в обмотках крупных электрических машин переменного тока, проектируемых институтом ФГУП «НИИ Электромашиностроения» (имеется *Акт о внедрении*, 2004 г.).

2. Разработанные в диссертационной работе методы, алгоритмы и вычислительные программы электромагнитных расчетов многофазных токопроводов успешно апробированы при определении электрических и электромагнитных параметров комплектных токопроводов и шинопроводов серий ТЭКН (ТЭНЕ), ТЗК и ТЗКР, производимых заводами ОАО «Невский завод «Электроштит» (имеется *Справка о внедрении*, 2004 г.) и ОАО «Московский завод «Электроштит» (имеется *Акт об использовании*, 2004 г.), и в настоящее время внедряются в конструкторских бюро этих предприятий, что позволит уточнить технические условия на уже выпускаемую продукцию и ускорить проектирование новых вариантов мощных токопроводов и шинопроводов.

3. Отдельные результаты работы переданы в институт ФГУП «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова» (имеется *Справка о возможном использовании*, 2004 г.) и на заводы ОАО «Силовые машины – Электросила» /филиал в Санкт-Петербурге/ (имеется *Справка о возможном использовании*, 2004 г.) и ЗАО «ЗЭТО» /г. Великие Луки/ (имеется *Справка об использовании*, 2004 г.).

4. Некоторые теоретические и практические результаты, полученные в диссертационной работе, внедрены в учебный процесс на электромеханическом факультете СПбГПУ (имеется *Акт о внедрении*, 2004 г.). Они включены в разделы курса ТОЭ, относящиеся к теории ЭМП, и спецкурс «Расчет электромагнитных полей», а также использованы при написании двух учебных пособий кафедры ТОЭ, одно из которых издано с грифом Госкомитета РФ по высшему образованию. Разработанные автором компьютерные программы используются для теоретических расчетов при выполнении ряда работ в лаборатории ЭМП кафедры ТОЭ. Алгоритмы этих расчетов и инструкции для использования программ помещены в последнее издание учебного пособия «Руководство к лаборатории электромагнитного поля» (Изд-во СПбГПУ, 2003 г.).

На защиту выносятся:

- расчетные модели на основе веерных схем замещения экранированных токоведущих систем с массивными немагнитными шинами и экранами, пригодные для анализа как установившихся, так и переходных режимов работы систем с учетом поверхностного эффекта и эффекта близости;
- методика расчета параметров веерных схемных моделей токоведущих систем, окруженных идеальными экранами, потерь и электромагнитных сил, действующих на шины и экраны таких систем;
- многовеерные схемы замещения, учитывающие скин-эффект в токопроводах с шинами, выполненными из магнитных материалов (стали) с постоянными магнитными свойствами;
- алгоритм расчета электродинамических процессов в транспортными системах левитационного типа, основанный на применении разработанных схемных моделей для учета скин-эффекта в проводящих элементах систем;
- решетчато-полевые схемы замещения тонких проводящих немагнитных пластин и оболочек;
- интегральные схемы замещения волноводов в виде металлических труб, используемых для передачи электромагнитной энергии в диапазоне СВЧ.

Достоверность полученных результатов:

- обеспечивается применением фундаментальных законов и методов теории электрических цепей и теории ЭМП, методов теории функций комплексного переменного и вычислительной математики, а также строгими математическими доказательствами и выводами;
- подтверждается совпадением результатов расчетов по разработанным алгоритмам и компьютерным программам с известными аналитическими решениями модельных задач;
- подтверждается согласованием результатов расчетов по предложенным в работе методикам с данными экспериментов, результатами заводских испытаний и результатами исследований других авторов, представленными в печатных изданиях.

Апробация работы. Теоретические положения и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: Всесоюзной научно-технической конференции «*Математическое моделирование в энергетике*» (Киев, 1990); международной конференции по прикладным задачам теории электромагнитного поля (Ханчжоу, Китай, 1992); международных научно-методических конференциях «*Высокие интеллектуальные технологии образования и науки*» (Санкт-Петербург, 1995-1998, 2004); Российской научно-технической конференции «*Инновационные наукоемкие технологии для России*» (Санкт-Петербург, 1995); международных конференциях по передовым методам в электротехнике применительно к энергетическим системам (Пльзень, Чехия, 1995, 1999); межвузовских научных конференциях в рамках Недель науки СПбГПУ (Санкт-Петербург, 1996-2003); научно-технических конференциях вузов-членов Ассоциации технических университетов России «*Фундаментальные исследования в технических университетах*» (Санкт-Петербург, 1997, 1998); научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов СПбГУТ (Санкт-Петербург, 1999, 2002, 2003); международной конференции по нетрадиционным электромеханическим и электрическим системам (Санкт-Петербург, 1999); Всероссийском электротехническом Конгрессе с международным участием «*На рубеже веков: итоги и перспективы*» (Москва, 1999); заседании секции «*Электромеханика и автоматика*» при Доме ученых им. М. Горького РАН (Санкт-Петербург, 1999); международных экологических Симпозиумах (Санкт-Петербург, 2000, 2002); Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы «*Фундаментальные исследования в технических университетах*» (Санкт-Петербург, 2002); международной научно-практической конференции «*Теоретические и практические проблемы развития электроэнергетики России*» (Санкт-Петербург, 2002); научных семинарах кафедр ТОЭ СПбГПУ и теории электрических цепей СПбГУТ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 66 печатных работ, включая учебное пособие с грифом ГК РФ ВО, 26 статей (в том числе 12 статей в ведущих отечественных научных журналах: «*Известия РАН. Энергетика*»; «*Электричество*»; «*Электротехника*»; «*Журнал технической физики*»; «*Радиотехника и электроника. АН СССР*»; «*Радиотехника*»), 39 тезисов докладов, из которых 26 в материалах всесоюзных, всероссийских и международных конференций. Отдельные материалы и результаты диссертационной работы представлены также в учебном пособии кафедры ТОЭ «*Теоретические основы электротехники. Новые идеи и принципы. Схемоанализ и диакоптика*» (автор М.А. Шакиров. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 212 с.), в котором глава 8 (стр. 164-195) и раздел 9.5 (стр. 206-208) написаны профессором М.А. Шакировым и автором диссертации совместно.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 280 наименований, пяти приложений (последнее приложение содержит документы, подтверждающие внедрение и использование результатов диссертационной работы). Общий объем работы 350 страниц, рисунков – 71, таблиц – 46.

Содержание работы

Во введении дана краткая характеристика диссертационной работы.

Первая глава «Верные схемные модели токоведущих систем с массивными шинами и экранами» посвящена разработке новых эффективных расчетных моделей и электрических схем замещения многофазных промышленных токопроводов с немагнитными элементами, позволяющих быстро и точно рассчитать любые их характеристики: эквивалентные и вносимые сопротивления, индуктивности, мощности потерь в отдельных частях любых элементов токопроводов и электромагнитные силы, действующие на них в установившихся режимах.

Электромагнитный расчет электротехнических устройств с учетом поверхностного эффекта в массивных токоведущих элементах в общем случае при трехмерной конфигурации устройств представляет собой весьма сложную задачу. Вместе с тем на практике в большинстве случаев задачи электромагнитного расчета ТЭС достаточно рассматривать в плоскопараллельной постановке, полагая все процессы квазистационарными.

Типичным примером такого устройства является токопровод, представляющий собой систему параллельных немагнитных ($\mu = \mu_0$) шин произвольной формы поперечного сечения с транспортными токами. Шины могут проходить вблизи экранов или быть окруженными ими. В расчет принимаются либо *реальные* электрофизические свойства проводящих немагнитных экранов ($\gamma_s \neq 0$, $\gamma_s \neq \infty$ и $\mu_s = \mu_0$), либо эти свойства полагаются идеализированными, т. е. экраны рассматриваются как *идеальные*: *магнитные* при $\gamma = 0$ и $\mu = \infty$; *электромагнитные* при $\mu = \mu_0$ и $\gamma = \infty$ (μ – магнитная проницаемость; γ – удельная электрическая проводимость).

Исследование ТЭС связано с решением следующих двух задач.

1. Важной задачей при проектировании, например, многофазного экранированного токопровода, является определение его *электромагнитных параметров*. Заданными считаются геометрия системы, электрофизические свойства материалов шин и экранов и, как правило, токи шин. Искомыми являются продольные токи экранов, мощности потерь в шинах и экранах, электродинамические силы и импульсы сил, действующих на шины и экраны, и коэффициенты экранирования.

2. Как элемент электрических систем, рассчитываемых методами теории электрических цепей, токопровод должен быть охарактеризован соответствующим комплексом сопротивлений переменному току, при линейных электрофизических характеристиках сред не зависящих от режима работы системы. Таким образом, расчет токопроводов состоит также в нахождении его *эквивалентных схемных параметров*, определяющих токопровод как элемент электрической цепи при любом режиме его работы.

Обе сформулированные задачи требуют определения токораспределения в проводах (шинах) и экранах ТЭС.

Как правило, задача приближенного расчета распределения тока в проводящих элементах электротехнических устройств формулируется в виде уравнений электрических цепей с сосредоточенными параметрами. Массивные проводящие элементы мысленно расщепляются на элементарные проводники (токовые волокна, токовые нити, трубки тока и т. п.), которым приписываются условные понятия об индуктивностях и взаимных индуктивностях. Между тем, понятие об *индуктивности* имеет непосредственный физический смысл лишь в применении к *замкнутым контурам*. Поэтому в диссертации предложено после расщепления массивных проводов (шин) и экранов на *элементарные проводники* (ЭП) включать последние тем или иным образом в замкнутые элементарные витки (ЭВ).

Для понимания этой идеи вначале изложены принципы построения простейших схемных моделей для симметричных немагнитных ТЭС в двух случаях (рис. 1, а и 2, а), условно названных «режим действия источников э. д. с.» и «режим действия источников тока».

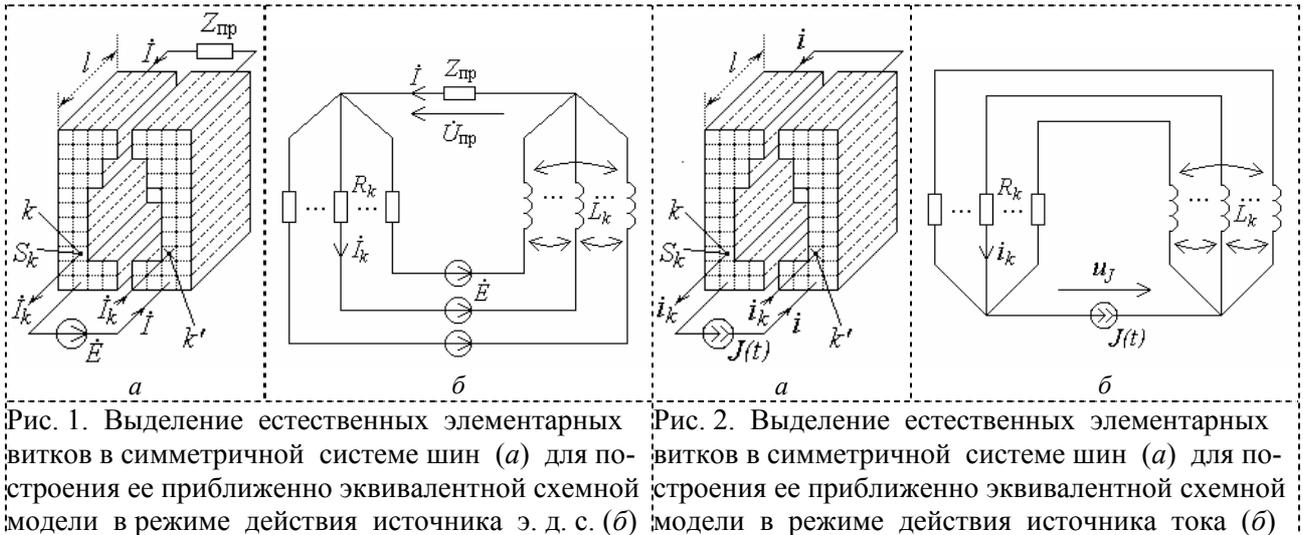


Рис. 1. Выделение естественных элементарных витков в симметричной системе шин (а) для построения ее приближенно эквивалентной схемной модели в режиме действия источника э. д. с. (б)

Рис. 2. Выделение естественных элементарных витков в симметричной системе шин (а) для построения ее приближенно эквивалентной схемной модели в режиме действия источника тока (б)

В обоих случаях при расщеплении шин на элементарные проводники размеры их поперечных сечений должны быть такими, чтобы элементарный ток i_k k -го ЭП можно было считать равномерно распределенным по его сечению площадью S_k и равным произведению $\delta_k S_k$, где δ_k – плотность тока в центре площадки S_k . Симметрия системы позволяет выделить *естественные элементарные витки* (ЕЭВ), образованные парами ЭП с «прямыми» и «обратными» элементарными токами. Активные (омические) сопротивления, индуктивности и взаимные индуктивности ЕЭВ рассчитываются по известным из курса ТОЭ формулам. Найденные по схемам замещения (рис. 1, б и 2, б) элементарные токи ЕЭВ i_k (\dot{I}_k – при синусоидальном режиме) могут быть затем использованы для расчета различных параметров ТВС. Очевидно, чем больше число ЭП, тем точнее схема замещения токопровода. Практика электромагнитных расчетов показывает, что приемлемые с точки зрения инженера-проектировщика результаты получаются, если поперечные размеры ЭП не превышают половины *эквивалентной глубины проникновения* электромагнитной волны $b_{\text{экр}} = \sqrt{2/(\omega\mu_0\gamma)}$ ($\omega=2\pi f$, f – частота тока).

Схемные модели, подобные приведенным на рис. 1, б и 2, б могут быть построены и для симметричных систем с «реальными» экранами (обесточенными проводами) и/или идеальными экранами. При наличии идеальных экранов для определения индуктивных параметров ЕЭВ следует использовать аппарат конформных преобразований.

В приложении П.1 приведены примеры применения рассмотренных схемных моделей для расчета электрических параметров трех симметричных ТВС при синусоидальном режиме работы. Достоверность полученных результатов подтверждена как сравнением их между собой (для первого примера выполнено несколько вариантов расчета, отличающихся степенью расщепления шин и использованием схемных моделей различных типов), так и сопоставлением их с экспериментальными данными, представленными в работах Л.Р. Неймана, И.Ф. Кузнецова и И.А. Зайцева — расхождение находилось в пределах от $-1,7$ до $-4,5\%$.

Основным содержанием первой главы является построение схемных моделей несимметричных ТВС, названных *веерными схемами замещения* из-за их веерообразной структуры. При этом ключевой является идея образования из ЭП фиктивных или, как они названы в работе, *условных элементарных витков*. Структура УЭВ зависит от того, заданы ли токи шин или напряжения между торцами шин на входе токопровода.

В режиме действия источников тока схемная модель токопровода строится следующим образом. Пусть по прямолинейным массивным проводам (шинам), окруженным в об-

щем случае идеальным экраном, протекают заданные синусоидальные токи $I_A = J_A$, $I_B = J_B, \dots$ (рис. 3, а). Если ток какой-то шины равен нулю, то эта шина фактически является

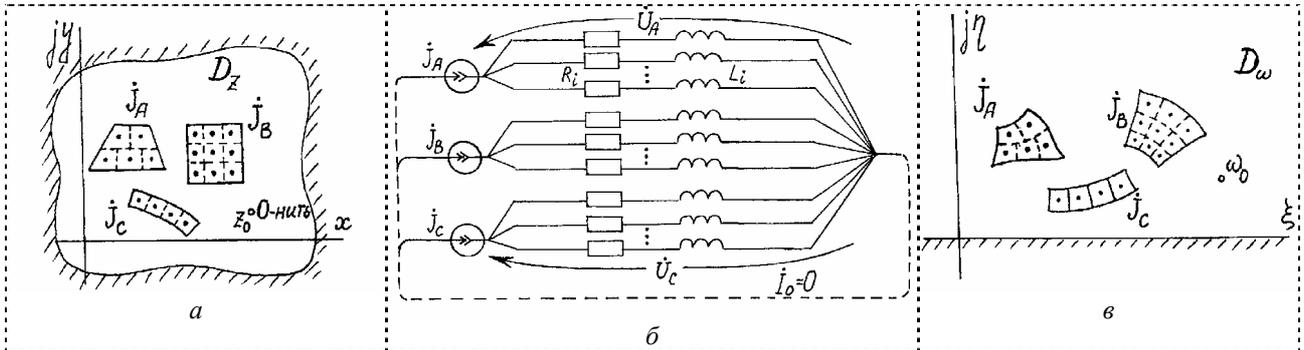


Рис. 3. Исходное сечение экранированного токопровода с заданными токами шин (а), схема замещения токопровода (б) и сечение токопровода, преобразованное конформным отображением $\omega = \omega(z)$, (в)

немагнитным экраном. Во всех реальных конструкциях для токов токопровода очевидно выполняется условие

$$I_A + I_B + \dots = 0. \quad (1)$$

При произвольных сечениях шин, их числе N и расположении относительно идеальных экранов расщепить шины на ЭП таким образом, чтобы наметились пары из *прямых* и *обратных* ЭП, образующие ЕЭВ, невозможно. Обойти эту трудность предложено введением *0-нити* — фиктивного проводника с радиусом сечения $\rho_0 \rightarrow 0$, играющей роль обратного провода одновременно для всех ЭП системы шин и образующей с каждым из них УЭВ. Из условия (1) следует, что ток 0-нити равен нулю, а значит, ее присутствие не влияет на поле системы и распределение тока в проводах и экранах. Поэтому она может проходить через любую точку z_0 области D_z , ограниченной идеальным экраном, в том числе и через точку на границе области. В приложении П.3 это положение проиллюстрировано подробно разработанными численными примерами расчета типовых однофазных систем.

Если число ЭП в шине A равно n_A , число ЭП в шине B равно n_B и т. д., то общее число УЭВ равно $n = n_A + n_B + \dots$. В результате заданную систему шин и экранов можно представить приближенной *веерообразной* моделью, состоящей из n УЭВ с общим обратным проводом, моделирующим 0-нить. Поэтому соответствующая схема замещения (рис. 3, б) названа *веерной*. Обозначим через $\mathbf{I}_A = \{I_k^A\}$ матрицу-столбец высотой n_A комплексных токов ЭП шины A и т. д. для остальных шин. Согласно схеме замещения расчет токов ЭП сводится к решению следующей системы $n+N$ уравнений (принято $N=3$)

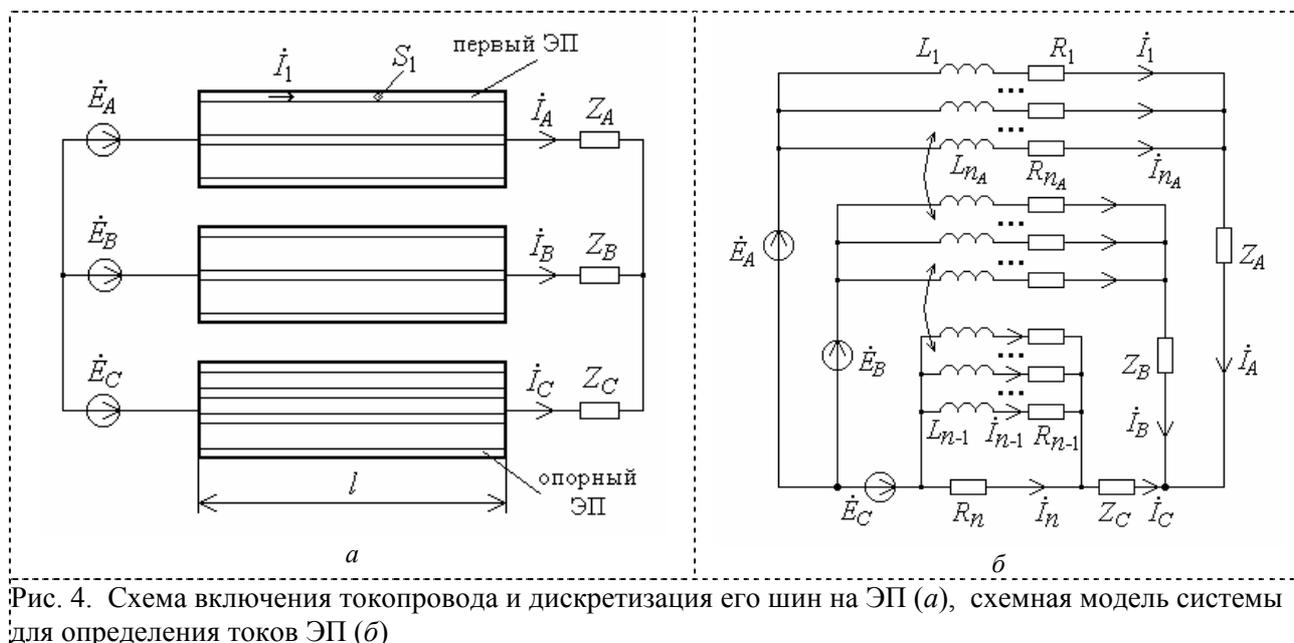
$$\begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline \mathbf{R}_A + j\omega\mathbf{M}_A & j\omega\mathbf{M}_{AB} & j\omega\mathbf{M}_{AC} & \mathbf{1}'_A & & \\ \hline j\omega\mathbf{M}_{BA} & \mathbf{R}_B + j\omega\mathbf{M}_B & j\omega\mathbf{M}_{BC} & & \mathbf{1}'_B & \\ \hline j\omega\mathbf{M}_{CA} & j\omega\mathbf{M}_{CB} & \mathbf{R}_C + j\omega\mathbf{M}_C & & & \mathbf{1}'_C \\ \hline \mathbf{1}_A & & & & & \\ \hline & \mathbf{1}_B & & & & \\ \hline & & \mathbf{1}_C & & & \\ \hline \end{array} \times \begin{array}{|c|c|} \hline \mathbf{I}_A \\ \hline \mathbf{I}_B \\ \hline \mathbf{I}_C \\ \hline \dot{U}_{JA} \\ \hline \dot{U}_{JB} \\ \hline \dot{U}_{JC} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline \dot{J}_A \\ \hline \dot{J}_B \\ \hline \dot{J}_C \\ \hline \end{array}, \quad (2)$$

где \mathbf{R}_A — диагональная матрица ($n_A \times n_A$) активных сопротивлений ЭП шины A ; \mathbf{M}_A — симметричная матрица ($n_A \times n_A$) *условных собственных* и *взаимных индуктивностей* УЭВ, образованных ЭП шины A и 0-нитью; \mathbf{M}_{AB} — прямоугольная матрица ($n_A \times n_B$) *условных взаимных индуктивностей* УЭВ «ЭП шины A — 0-нить» и «ЭП шины B — 0-нить»; $\mathbf{M}_{BA} = \mathbf{M}'_{AB}$;

t – знак транспонирования; $\mathbf{1}_A$ – единичная матрица-строка шириной n_A ; \dot{U}_{JA} – комплекс напряжения на источнике тока \dot{J}_A , задающем ток в шине A , и т. д.

Термины *условная собственная индуктивность* и *условная взаимная индуктивность* указывают на то, что индуктивности УЭВ зависят от месторасположения 0-нити. Определение индуктивностей УЭВ является одним из основных этапов практического использования построенных схемных моделей для электромагнитных расчетов ТВС. Составной частью каждого УЭВ является 0-нить толщиной $2\rho_0 \rightarrow 0$, при этом их индуктивности бесконечно велики. Поэтому в полученных формулах для индуктивностей УЭВ выделено, а затем опущено одинаковое слагаемое, содержащее параметры 0-нити. Пренебрежение этим слагаемым соответствует *преобразованию переноса* индуктивности, определяемой выделенным слагаемым, через общий узел веерной схемы в 0-нить, инвариантному относительно токов схемной модели.

В режиме действия источников э. д. с. схемная модель токопровода строится следующим образом. Рассмотрим пример трехфазного токопровода с немагнитными шинами без экранов (рис. 1.4, а). Для демонстрации возможности комплексного расчета токопровода с нагрузкой к выходу токопровода подключен трехфазный приемник с сопротивлениями Z_A , Z_B и Z_C .



Для получения приближенной схемной модели токопровода массивные шины фаз расщепляются на n_A , n_B и n_C (а все вместе на $n_A+n_B+n_C=n$) ЭП. Далее также используется концепция *условных элементарных витков*, но в отличие от «токового режима», когда *прямыми* проводниками УЭВ являлись все ЭП шин, а *обратными* — общая для всех витков 0-нить, в рассматриваемом случае ТВС представляется совокупностью УЭВ, содержащей $n-1$ виток, *обратными* проводами которых является один из ЭП системы, *общий* для всех витков. Поскольку искомое токораспределение не должно зависеть от того, в какой шине и который ЭП выбран в качестве общего обратного, то им может быть любой ЭП системы. Шина, в которой выбран общий ЭП для всех УЭВ, рассматривается в качестве *опорной* при формировании заданных напряжений между торцами шин токопровода со стороны его входа. Тогда общий ЭП является также и *опорным* при записи напряжений между торцами ЭП со стороны входа ТВС. Совокупности образованных таким образом УЭВ, когда общим (опорным) ЭП выбран последний ЭП в шине фазы C (n -ый ЭП), соответствует веерная схема замещения на рис. 4, б.

Для определения индуктивных параметров предложенных схемных моделей вначале получены расчетные формулы для УЭВ в случае отсутствия идеальных экранов. При выводе формул для расчета условных индуктивностей УЭВ, расположенных вблизи идеальных экранов, принято положение об инвариантности индуктивностей контуров (витков) из *весьма тонких проводников* относительно конформных преобразований. В работе подробно рассмотрен случай, когда расчетная область D_z , ограниченная идеальным экраном, является односвязной (рис. 3, а). При этом интересующие индуктивности определялись как индуктивности более простых систем, полученных с использованием конформного отображения $\omega = \omega(z)$ сложной области D_z на каноническую область D_ω , представляющую собой верхнюю ω -полуплоскость (рис. 3, в).

В рассматриваемой главе представлены также формулы для расчета составляющих вектора напряженности переменного (произвольно меняющегося во времени) магнитного поля по токам ЭП, когда расчетная область D_z , ограниченная идеальным экраном, является односвязной. Приведены также выражения комплексов составляющих вектора напряженности магнитного поля для случая изменения токов по синусоидальному закону. В последнем случае число $j = \sqrt{-1}$ (мнимая единица) использовалось двояко: как *пространственно-геометрическая* величина и как *фаза-временная*. С практической точки зрения оказалось целесообразным использование *абстрактного* понятия о смешанной *пространственно-временной* комплексной напряженности плоскопараллельного магнитного поля синусоидальных токов, в которой обе мнимые единицы смешиваются:

$$\dot{H} = \dot{H}_x + j\dot{H}_y = (H'_x + jH''_x) + j(H'_y + jH''_y) = (H'_x - H''_y) + j(H'_y + H''_x),$$

названной в работе *бикомплексной напряженностью* магнитного поля.

Для расчета *электромагнитных сил*, действующих на элементы токоведущих систем, в общем случае расположения ТВС вблизи идеальных магнитных или электромагнитных экранов в работе рассмотрены в сравнении два подхода.

Первый подход основан на теореме М.А. Шакирова *о преобразовании механической силы, действующей на линейный провод (нить) с током J_0 , при конформных отображениях областей* [ЖТФ, 1994, т. 64, № 7]. В диссертации разработана методика численного расчета мгновенной и средней за период T (при периодическом изменении источников магнитного поля) электромагнитной силы, действующей на выделенный объем ТВС (цилиндр единичной длины). Выведены выражения для аналитического и численного расчета сил как при переходных, так и при синусоидальном режимах работы ТВС.

Второй подход базируется на применении общей формулы Максвелла для электромагнитной силы, согласно которой электромагнитная сила \mathbf{f} , действующая на выделенный объем V (в случае плоскопараллельного поля это цилиндр единичной длины, поперечное сечение которого ограничено контуром l) определяется с помощью натяжения \mathbf{T}_n : $\mathbf{f}(t) = \oint_S \mathbf{T}_n(t) dS$, где S – поверхность, ограничивающая объем V . На основе этой формулы

выведено выражение для расчета средней за период T электромагнитной силы при синусоидальных токах, в которое входит бикомплексная напряженность магнитного поля:

$$\mathbf{F} = F_x + jF_y = j \frac{\mu_0}{2} \oint_l \dot{H} (\dot{H})^* dz^*.$$

Возможность определения сил двумя методами позволяет контролировать правильность и достоверность выполняемых расчетов. В результате численных экспериментов установлено, что расчет электромагнитных сил первым методом выполняется на порядок быстрее, чем вторым. Это необходимо иметь в виду при анализе переходных процессов.

Важной частью предложенных в работе алгоритмов расчета распределения тока по сечению ТВС, проходящей вблизи идеального экрана, является построение функции $\omega=\omega(z)$, отображающей заданную расчетную область D_z , ограниченную идеальным экраном (рис. 1.3, а), на каноническую область D_ω в виде верхней ω -полуплоскости (рис. 1.3, в) и определение на ней точек ω_k , соответствующих центральным точкам z_k сечений ЭП в исходной области. По характеру геометрической сложности отображаемые области D_z подразделены на *простые* [для которых может быть построена отображающая функция $\omega=\omega(z)$ в виде аналитического выражения], *сложные* [для которых невозможно построить отображающую функцию в виде $\omega=f(z)$, но можно построить в виде аналитического выражения $z=F(\omega)$ функцию, при помощи которой выполняется обратное отображение] и *сверхсложные* [для которых невозможно построить конформное отображение на каноническую область и обратное отображение с помощью функций в аналитической форме, а координаты ω_k центров сечений ЭП в верхней ω -полуплоскости могут быть найдены лишь приближенно численными методами]. В соответствии с перечисленными типами исходных расчетных областей D_z в работе классифицированы и задачи расчета токораспределения в ТВС с идеальными экранами, при решении которых необходимо выполнять конформные отображения, как *простые*, *сложные* и *сверхсложные задачи*. В приложении П.3 приведены 16 примеров применения схемных моделей для решения задач всех перечисленных типов. Для анализа поверхностного эффекта в системах с идеальными экранами сверхсложной формы в работе разработан подход, позволяющий на этапе конформного отображения расчетных областей использовать оригинальные численные методы синтеза конформных отображений сверхсложных областей, разработанные на кафедре ТОЭ СПбГПУ профессором М.А. Шакировым и его учеником Ю.А. Майоровым [Электротехника, 1998, №№ 8, 9, 12].

Цель второй главы «Электромагнитные расчеты трехфазных токоведущих систем электроэнергетических и электротехнических устройств с использованием веерных схемных моделей» — исследование и применение разработанных в первой главе веерных схем замещения многофазных ТВС для определения электрических и электромагнитных параметров трехфазных ТВС электроэнергетического оборудования и электротехнических устройств различного назначения. В связи с этим рассмотрен ряд конкретных примеров и модельных задач. В *первом примере* демонстрируется достоверность применения веерных схемных моделей при расчете характеристик 15-и вариантов трехфазных ТВС сравнением с экспериментальными данными, опубликованными профессором И.Ф. Кузнецовым для токопроводов с шинами прямоугольного и трубчатого сечений. Показано, что изменение положения 0-нити веерной схемной модели не влияет на результаты расчета активных сопротивлений фаз.

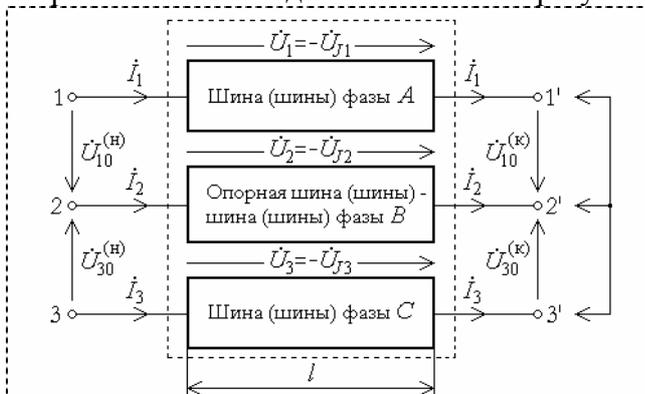


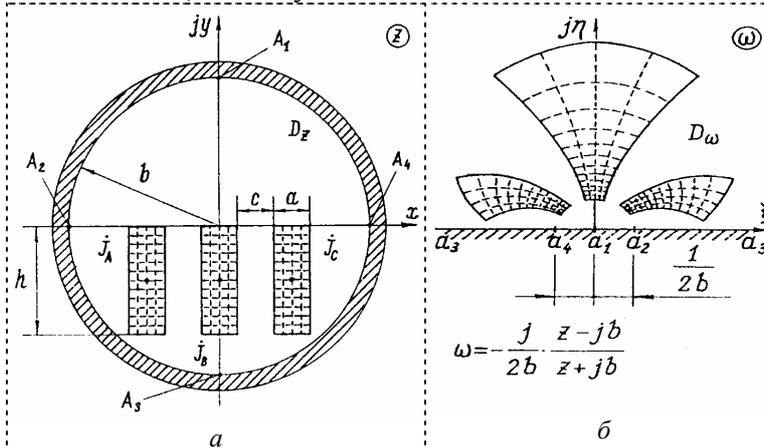
Рис. 5. К определению электрических параметров трехфазного токопровода

Во *втором примере* иллюстрируется эффективность и достоверность применения веерных схемных моделей для расчета электрических параметров трехфазных токоведущих систем (многочисленные примеры расчета электрических параметров однофазных ТВС приведены в приложениях П.1 и П.3). Изложен эффективный алгоритм расчета электрических (эквивалентных) параметров трехфазных токопроводов с массивными шинами (рис. 5), основанный на применении схемной модели токопровода при задании токов шин. Правильность получаемых с его помощью результатов проверена расчетами всех 13 конструкций многофазных токоведущих систем, исследованных в известной монографии О.В. Тозони и Т.Я. Колеровой — в диссертации рассмотрены две из них. Показано, что получаемые с использованием схемных моде-

людей результаты проверены расчетами всех 13 конструкций многофазных токоведущих систем, исследованных в известной монографии О.В. Тозони и Т.Я. Колеровой — в диссертации рассмотрены две из них. Показано, что получаемые с использованием схемных моде-

лей результаты не только достоверны, но и при одинаковой дискретизации шин ТВС несколько точнее (на ~4%) результатов численных расчетов методом интегральных уравнений, представленных в монографии О.В. Тозони и Т.Я. Колеровой.

В *третьем примере* рассматривается применение разработанных в первой главе методов к расчету электромагнитных сил, действующих в экранированном идеальным (как магнитным, так и электромагнитным) экраном трехфазном токопроводе (рис. 6). Сравнены два подхода: 1) когда массивные шины заменяются тонкими (*линейными*) проводниками, проходящими через центры сечений шин, и скин-эффект не учитывается; 2) когда электромагнитные силы, действующие на массивные алюминиевые шины, определяются с учетом скин-

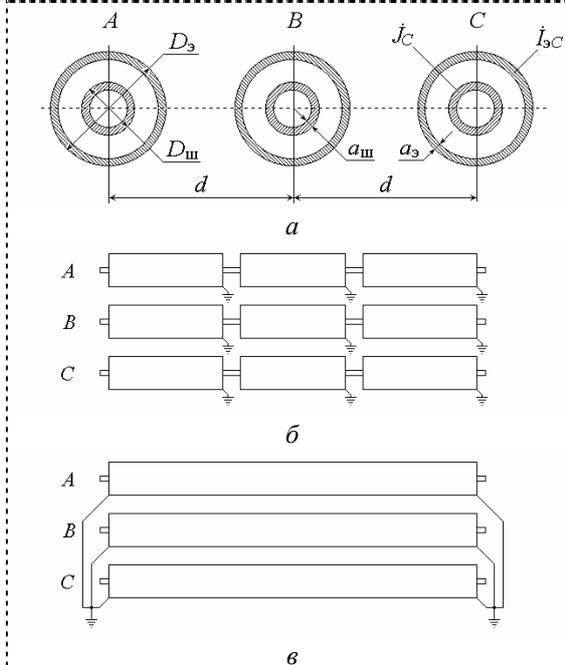


эффекта. Расчетами, выполненными в диапазоне частот от 0,1 Гц до 800 Гц, подтверждены, в частности, следующие положения: электромагнитные силы в системе *линейных токов* с идеальными экранами (как и без них) *не зависят* от частоты переменного тока; в отличие случая *линейных токов* на шину *B* действует сила даже при отсутствии экранов; электромагнитная сила, действующая на шину *A*, не равна силе, действующей на шину *C*, т. е. электромагнитные силы, найденные с учетом скин-эффекта, зависят от порядка следования фаз (это явление имеет место и при отсутствии экранов).

Рис. 6. Сечение трехфазного токопровода, окруженного идеальным экраном, на исходной z -плоскости (a) и его отображение на верхнюю ω -полуплоскость (b)

Четвертый пример

посвящен расчету электромагнитных параметров токопроводов



и шинопроводов электрических станций. Дана общая характеристика этих устройств. В приложении П.4 представлены конструкции промышленных закрытых токопроводов и шинопроводов, предназначенных для выполнения электрических соединений в основных цепях электрических станций, и шесть примеров расчета (10 вариантов) параметров токопроводов генераторного напряжения и закрытых токопроводов и шинопроводов напряжением 0,4-1,0 кВ, серийно выпускаемых Московским и Невским заводами «Электрощит».

Оценка эффективности расчета электромагнитных параметров мощных токопроводов с помощью разработанных в диссертации схемных моделей осуществлена сравнением результатов расчетов с экспериментальными данными для пофазно-экранированных токопроводов (рис. 7), полученными в американской лаборатории, имеющей много-

Рис. 7. Поперечное сечение пофазно-экранированного токопровода (a) с секционированными (b) и непрерывными (c) экранами

голетний опыт измерений calorиметрическим методом местных и средних потерь в элементах электрических приборов и аппаратов. Погрешность измерений мощности потерь в шинах и экранах не превышала 3%. Результаты выполненных нами расчетов отличаются от данных экс-

периментов не более, чем на 5%, что подтверждает эффективность метода расчета электромагнитных параметров ТВС, основанного на построенных в работе схемных моделях.

В *пятом примере* веерные схемы замещения применяются для электромагнитных расчетов силовых кабелей. При проектировании таких кабелей важны учет электрических потерь в металлических оболочках (трубах) кабелей и оценка их внешних электромагнитных полей. Рассмотрены особенности расчета мощности потерь в металлических оболочках высоковольтных *маслонаполненных* и *газонаполненных* кабелей.

Примеры расчета мощности потерь в *немагнитных* оболочках (трубах) различных маслонаполненных кабелей и кабеля с газовой изоляцией с использованием схемной модели (рис. 3, *a*) приведены в приложении П.4, некоторые из полученных результатов сравниваются как с данными, имеющимися в литературе, так и с результатами выполненных в диссертации расчетов по методикам, опубликованным другими авторами.

Для определения потерь в трубе маслонаполненного кабеля, выполненной из *магнитного* материала (ферромагнетика), предложен простой алгоритм приближенного расчета, использующий разработанные в первой главе схемные модели ТВС при наличии идеальных экранов. С учетом того обстоятельства, что ферромагнитная труба охватывает все токонесущие жилы кабеля, задача упрощена: магнитная проницаемость трубы μ_r принята постоянной (тем самым пренебрегаем и гистерезисом), ее значение можно выбрать по основной кривой намагничивания стали с использованием оценочного значения напряженности магнитного поля на внутренней поверхности трубы S_r . В трубе имеет место сильный поверхностный эффект, поэтому для определения мощности потерь в трубе P_T может быть использована известная формула $P_T = \sqrt{\omega \mu_r / (2\gamma_r)} \int_{S_r} H^2 dS$. Необходимое для ее применения распределение

напряженности магнитного поля на внутренней поверхности трубы предложено найти приближенно, идеализируя те или иные электрофизические свойства трубы, например, можно рассматривать ее как идеальный магнитный экран. Приемлемость такой идеализации при $\mu_r \geq 50\mu_0$ подтверждена, в частности, экспериментальными исследованиями, выполненными профессором И.Ф. Кузнецовым и его учеником А.Б. Бучельниковым. Таким образом, исходная задача сведена к задаче расчета ТВС при наличии идеальных экранов (рис. 3 и 6). Приведены результаты расчета коэффициента потерь в трубопроводе кабеля марки МВДТ на напряжение 220 кВ, согласующиеся с данными, полученными Э.Т. Лариной по полуэмпирической формуле (отличие составляет 25%).

Цель *шестого примера* — применение веерных схем замещения, разработанных в первой главе, при проектировании электродинамических систем, принцип действия которых основан на явлении скин-эффекта, например, асинхронных линейных двигателей, в том числе и односторонних (ОАЛД). Последние представляют, в частности, интерес с точки зрения создания транспортных систем (ТС), электромагнитный полет которых, т. е. подвешивание над проводящим путевым полотном («проводящим немагнитным рельсом») и тяга подвижной части (экипажа), осуществляется исключительно за счет вихревых токов, возникающих в проводящем полотне.

Применение ОАЛД в ТС показано на рис. 8, *a*. Первичная (подвижная) часть включает идеальный магнитопровод длиной l_1 и индуктор в виде m -фазной системы катушек A, B, C, \dots , питаемых синусоидальным током частоты f_1 . Через τ обозначено полюсное деление для случая $m=3$. Вторичная часть представлена идеальным магнитным ярмом и немагнитной проводящей полосой (полотном) толщиной h и длиной l_2 . Подвешивание и тяга экипажа возникает вследствие наведения переменным магнитным полем индуктора первичной части вихревых токов (они протекают в направлении, перпендикулярном плоскости рис. 8, *a*) частоты $f_2 = s f_1$ (где s – скольжение) в проводящей полосе вторичной части. Если V – скорость полета экипажа, то $s = 1 - V/V_c$, где $V_c = 2\tau f_1$ – синхронная скорость поля в ОАЛД.

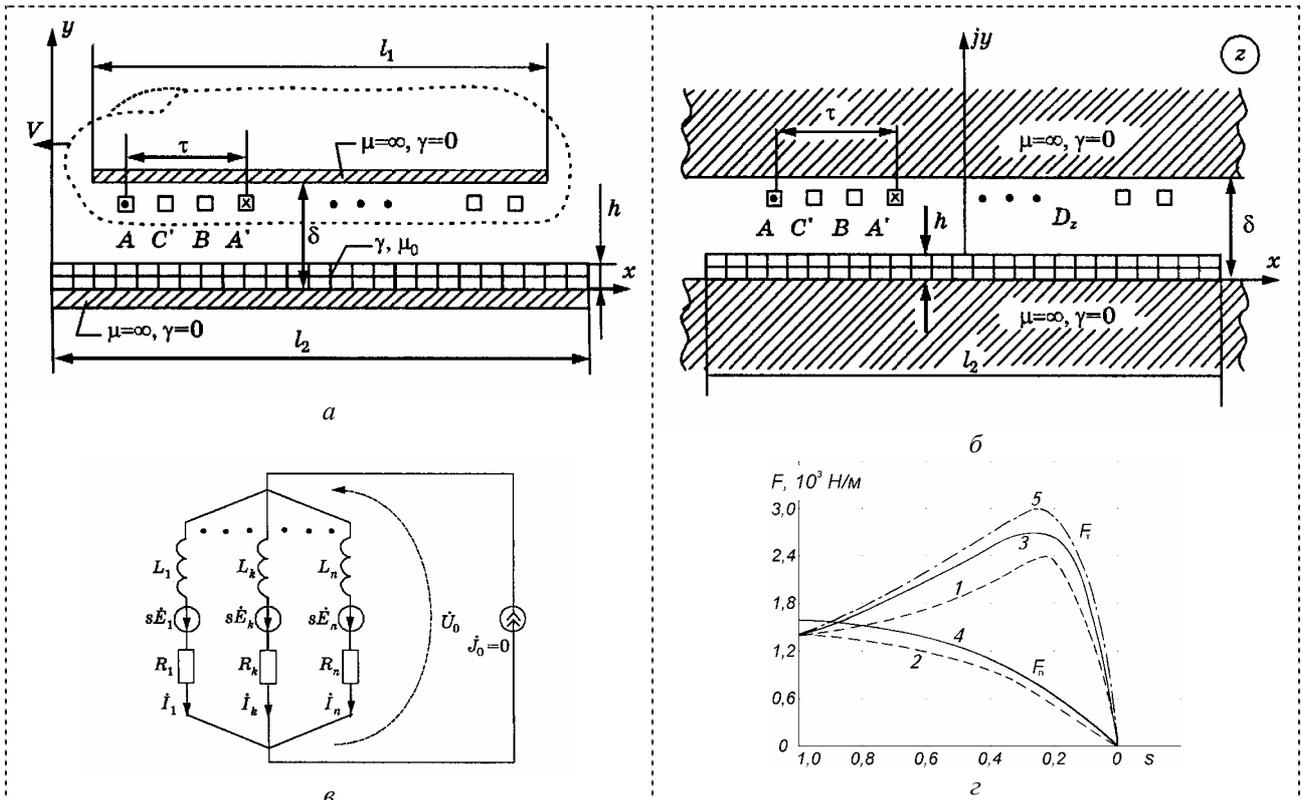


Рис. 8. Модели ОАЛД с конечными (а) и бесконечно протяженными (б) магнитопроводами; веерная схема замещения ОАЛД (в); зависимости сил тяги F_T и левитации F_L в ОАЛД от скольжения s (д), полученные: 1, 2 – С.А. Насаром и И. Болдеа для идеализированного ОАЛД; 3-5 – расчетом по изложенной в диссертации методике

Проводящая полоса представляет собой массивный проводник с удельной проводимостью γ . На рис. 8, а показан пример расщепления проводящей полосы на n одинаковых ЭП. Из системы ЭП можно образовать совокупность УЭВ, прямыми проводниками которых являются ЭП, а обратными — общая для всех УЭВ 0-нить с током $j_0=0$. В диссертации описаны особенности построения веерной схемы замещения ОАЛД (рис. 8, в) и изложен алгоритм расчета вихревых токов и электромагнитных сил, численно проиллюстрированный на трех примерах. Сравнение рассчитанных электромагнитных сил с экспериментальными результатами, полученными на лабораторной установке кафедры ТОЭ СПбГПУ (создана доцентом А.А. Модеровым) для демонстрации электромагнитных сил левитации, обусловленных вихревыми токами, также подтвердило высокую достоверность и адекватность веерных схем замещения физическим процессам — расхождение не превысило 5%.

В третьей главе «Решетчатая цепно-полевая схема замещения для расчета вихревых токов в немагнитных проводящих пластинах и оболочках» рассмотрена актуальная для проблем электромагнитной совместимости и экранирования задача расчета вихревых токов, возбуждаемых в *тонких* немагнитных проводящих пластинах и оболочках внешним магнитным полем, произвольно меняющимся во времени и пространстве. Под *тонкой* понимается оболочка, толщина h которой существенно меньше прочих размеров (рис. 9, а) и меньше толщины скин-слоя. Задача решалась в квазистационарной постановке с учетом реакции оболочек. Число оболочек, их форма и связность не ограничивалась. В отличие от традиционных подходов, основанных на использовании интегральных уравнений для функций векторного или скалярного магнитных потенциалов или функции тока, расчет проводился на основе схемных моделей относительно реальных вихревых токов.

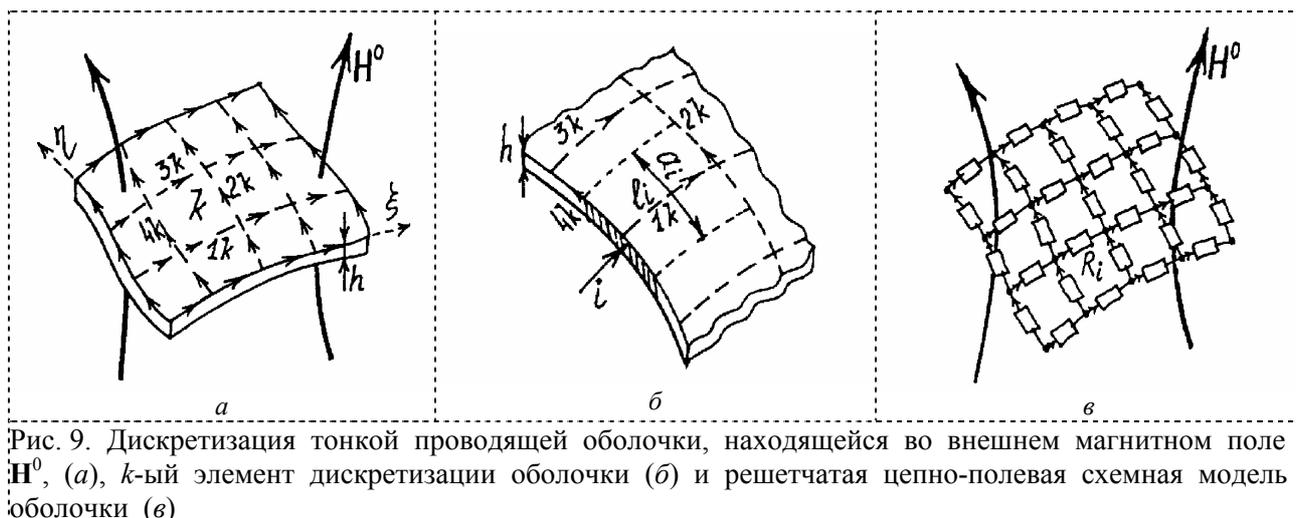


Рис. 9. Дискретизация тонкой проводящей оболочки, находящейся во внешнем магнитном поле \mathbf{H}^0 , (а), k -ый элемент дискретизации оболочки (б) и решетчатая цепно-полевая схемная модель оболочки (в)

Решетчатая цепно-полевая модель тонкой проводящей немагнитной оболочки построена следующим образом. Оболочку мысленно заменяем совокупностью проводящих элементов, полученных в результате дискретизации оболочки некоторой сеткой, нанесенной на ее поверхность. Ячейки сетки могут иметь произвольную форму. На рис. 9, а показана ортогональная сетка с четырехугольными ячейками. Число независимых контуров сетки равно числу ее ячеек. Согласно закону электромагнитной индукции для k -ой ячейки сетки можем записать

$$\oint_{l_k} \mathbf{E}^B \mathbf{dl} = \oint_{l_k} E_l^B dl = \int_{l_{1k}} \frac{\delta_l^B}{\gamma} dl + \int_{l_{2k}} \frac{\delta_l^B}{\gamma} dl - \int_{l_{3k}} \frac{\delta_l^B}{\gamma} dl - \int_{l_{4k}} \frac{\delta_l^B}{\gamma} dl = - \frac{\partial(\Phi_k^0 + \Phi_k^B)}{\partial t}, \quad (3)$$

где E_l^B и δ_l^B – проекции векторов \mathbf{E}^B и δ^B на направление \mathbf{dl} ; Φ_k^0 – магнитный поток внешнего поля, пронизывающий k -ую ячейку оболочки; Φ_k^B – магнитный поток сквозь k -ую ячейку, обусловленный вихревыми токами в оболочке.

При достаточно малых размерах ячеек сетки можно считать их плоскими прямоугольниками со сторонами a_i и b_i . На рис. 9, б показана k -ая ячейка оболочки вместе с одной из смежных ячеек. Общую сторону 1_k смежных ячеек рассматриваем как проекцию на поверхность оболочки оси i -го ЭП длиной $l_{1k}=l_i=b_i$ и сечением $a_i \times h$. Полагая длину $l_{1k}=l_i$ весьма малой, второй интеграл в уравнении (3) можно вычислить следующим образом

$$\int_{l_i} \frac{\delta_l^B}{\gamma} dl \cong \delta_{l_i}^B \frac{l_i}{\gamma} = \delta_{l_i}^B a_i h \frac{l_i}{\gamma a_i h} = R_i i_i^B,$$

где $R_i = l_i / (\gamma a_i h)$ – омическое сопротивление i -го ЭП; $i_i^B = \delta_{l_i}^B a_i h$ – вихревой ток i -го ЭП.

Представив аналогичным образом все последующие интегралы в уравнении (3), получим следующее приближенное уравнение, выражающее закон электромагнитной индукции для k -ой ячейки оболочки:

$$\sum_{i=1_k}^{i=4_k} \pm R_i i_i^B + \frac{\partial \Phi_k^B}{\partial t} \cong - \frac{\partial \Phi_k^0}{\partial t}, \quad (4)$$

которое, очевидно, тем точнее, чем мельче ячейки сетки. Правую часть этого уравнения можно рассматривать как э. д. с. $e_k^0(t) = -\partial \Phi_k^0 / \partial t$, индуцируемую в контуре k -ой ячейки при изменении во времени внешнего магнитного поля.

Системе уравнений вида (4), сформированных для всех $K_0 = N_a \times N_b$ ячеек (контуров) сетки, соответствует изображенная на рис. 9 в цепно-полевая решетчатая схема замеще-

ния оболочки с числом ветвей, равным числу отрезков сетки $N_{br}=N_a \times (N_b+1) + N_b \times (N_a+1) = n + K_0 - 1$ (N_a – дискретизация оболочки по оси ξ , N_b – то же по ортогональной оси η , n – число узлов сетки). Ее отличие от обычных схемных моделей заключается в том, что она должна изображаться с сохранением геометрии оболочки и ее пространственного положения относительно внешнего магнитного поля, что позволяет непосредственно по ней определять магнитные потоки Φ_k^0 и Φ_k^B ($k=1, 2, \dots, K_0$), проходящие сквозь ячейки оболочки.

Для нахождения всех вихревых токов i_q^B ($q=1, 2, \dots, N_{br}$) уравнения вида (4) для контуров необходимо дополнить уравнениями для узлов сетки, составленными по первому закону Кирхгофа.

Ключевым моментом при формировании уравнений решетчатой цепно-полевой модели проводящей немагнитной оболочки является выражение магнитного потока Φ_k^B сквозь k -ую ячейку решетки через вихревые токи отрезков решетки. Можно сказать, что способом выражения магнитного потока Φ_k^B сквозь k -ую ячейку решетки через вихревые токи отрезков решетки при формировании контурных уравнений цепно-полевой решетки определяется тот или иной метод расчета вихревых токов, индуцируемых в проводящей оболочке.

Один из них связан с представлением магнитного потока Φ_k^B через векторный потенциал, создаваемый совокупностью вихревых токов отрезков решетки. При этом определение индуктивных параметров решетки по существу сводится к *методу участков* и цепно-полевая решетка превращается в обычную схемную модель.

Другой подход к получению выражения для магнитного потока Φ_k^B , изложенный в работе, основан на использовании закона Био-Савара-Лапласа для определения вкладов в Φ_k^B от вихревых токов отдельных отрезков решетки и суммировании этих вкладов. При этом реализуются *индуктивные связи ячеек решетки и ее отрезков*.

Для иллюстрации достоверности результатов, получаемых при помощи построенных схемных моделей, рассмотрена ставшая уже классической задача расчета вихревых токов в тонкой квадратной пластине, расположенной поперек однородного внешнего магнитного поля, изменяющегося во времени по синусоидальному закону. После определения комплексных токов I_q^B ($q=1, 2, \dots, N_{br}$) элементов (ветвей) решетки можно найти составляющую вектора линейной плотности вихревого тока в направлении i -ой ветви решетки: $J_i^B = I_i^B / a_i$. Объемная плотность вихревого тока в том же направлении, рассчитываемая по формуле $\dot{\delta}_i^B = J_i^B / h$, полагалась соответствующей середине i -го участка сетки пластины. Результаты расчета для трех значений параметра $c = \omega \mu_0 \gamma h$ хорошо согласуются со значениями J_i^B , полученными в диссертации пересчетом данных, найденных И.Д. Маергойзом и Л.А. Цейтлиным с использованием весьма сложного понятия *функции тока* (максимальные отличия не превышают 15%).

Структура цепно-полевой решетки подсказала идею определения ее электрического состояния с помощью контурных токов ячеек. При этом порядок системы уравнений, составленных по методу контурных токов, оказывается существенно меньшим числа отрезков (ветвей) решетки, а для формирования контурных уравнений используются *индуктивные связи между ячейками решетки*. Изложена методика расчета вихревых токов оболочки по токам решетки заменой контурных токов ее ячеек магнитными листками, достоверность которой проиллюстрирована на той же задаче расчета вихревых токов в квадратной пластине.

С целью дополнительной иллюстрации эффективности и возможностей разработанных методов расчета вихревых токов в немагнитных проводящих оболочках рассмотрены

три примера электромагнитного расчета систем, состоящих из двух тонких параллельных пластин.

Цель четвертой главы «Диакоптические схемы замещения для расчета критических параметров волн в полых волноводах» — построение схем замещения для определения критических параметров электромагнитных волн в трубчатых волноводах на основе так называемого метода *фундаментальной области* (ФО), разработанного на кафедре ТОЭ СПбГПУ профессором М.А. Шакировым применительно к диакоптике полей.

В основе диакоптики полей лежит та же, что и в диакоптике цепей, идея расчленения сложной расчетной области на независимо исследуемые части (суперэлементы) с последующим *сшиванием* результатов их взаимонезависимого анализа с целью создания высокоэффективных алгоритмов для проведения многовариантных расчётов полей при оптимизации электромагнитных устройств или осуществления численных расчётов полей при ограниченных ресурсах ЭВМ. Каждый суперэлемент рассматривается как бесконечномерный многополюсник, который после дискретизации границы суперэлемента на конечное число элементарных участков становится приближённо эквивалентным многомерным генератором э. д. с. (ЭМГЭ), имеющим структуру схемы-дерева. Внутренность суперэлемента дискретизации не подвергается. Сказанное составляет суть принципа соответствия диакоптики цепей и полей. Названные схемы замещения суперэлементов принципиально отличаются как от сеточных моделей, использованных Г. Кроном в диакоптике полей, так и от любых других дифференциальных моделей, включая конечные элементы, применение которых, как известно, предусматривает достаточно мелкую дискретизацию области расчета. Предложенным схемам замещения суперэлементов соответствуют аппроксимации не дифференциальных, а интегральных уравнений поля, которые оказываются тем точнее, чем крупнее суперэлементы. Часть границ суперэлемента может быть на бесконечности. Область суперэлемента должна иметь канонический вид, т. е. допускать построение для неё функции Грина в аналитической форме. Из сопоставления физического смысла функции Грина и сопротивлений ветвей ЭМГЭ выводятся аналитические выражения для определения параметров этих генераторов. Центральным этапом расчета поля является формирование и решение уравнений объединённой схемы, состоящей из приближенно эквивалентных ЭМГЭ. В целом имеет место аналитико-численный расчёт электромагнитного поля, полная аналогия всех этапов которого с анализом по частям сложных цепей исключает необходимость вывода соответствующих систем интегральных уравнений, ядра которых (при выборе суперэлементов достаточно сложной конфигурации) могут оказаться весьма громоздкими.

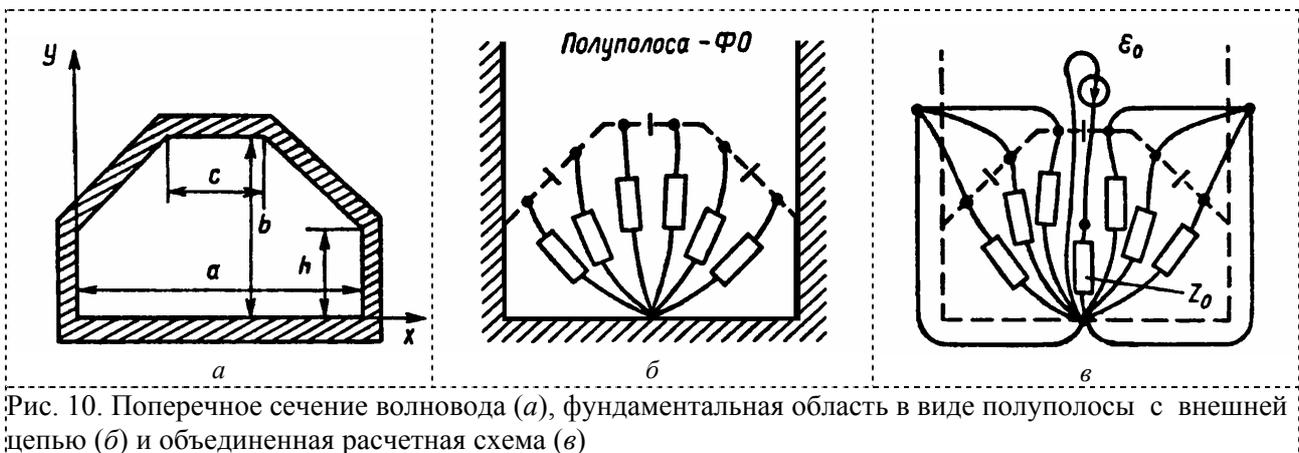


Рис. 10. Поперечное сечение волновода (а), фундаментальная область в виде полуполосы с внешней цепью (б) и объединенная расчетная схема (в)

Простейшей модификацией диакоптики полей является метод (*принцип*) ФО. Идея метода заключается в том, что при расчете поля в области D сложной формы вначале находится решение в более простой, *фундаментальной*, области D^F (суперэлементе), удовлетворяющей следующим двум условиям: 1) область D^F охватывает область D , при этом

части границ исходной области D , не совпадающие с границами фундаментальной области D^F , разрушаются (делаются прозрачными); 2) решение в области D^F выражается в аналитической (замкнутой) форме, на основе которого можно построить приближенную интегральную схемную модель области D^F в виде ЭМГЭ относительно разрушенных границ; это решение естественно называть *фундаментальным*. Затем получается решение для исходной области D путем восстановления утраченных границ в результате расчета объединенной схемы, состоящей из двух подсхем: ЭМГЭ и *внешней цепи*, реализующей исходные граничные условия для расчетной величины. Метод ФО можно трактовать как примитивно-декомпозиционный, поскольку он строится на принципе выделения двух объектов (подсистем): *внешней цепи* и *фундаментальной области*. Последняя играет роль единственного суперэлемента, который замещается приближенно эквивалентной схемой ЭМГЭ относительно внешней цепи. Внешняя же цепь столь примитивна, что не требует каких-либо упрощений. Термин «фундаментальная область» согласуется с принятым в математической физике отождествлением понятий «фундаментальное решение» и «функция Грина», через кото-

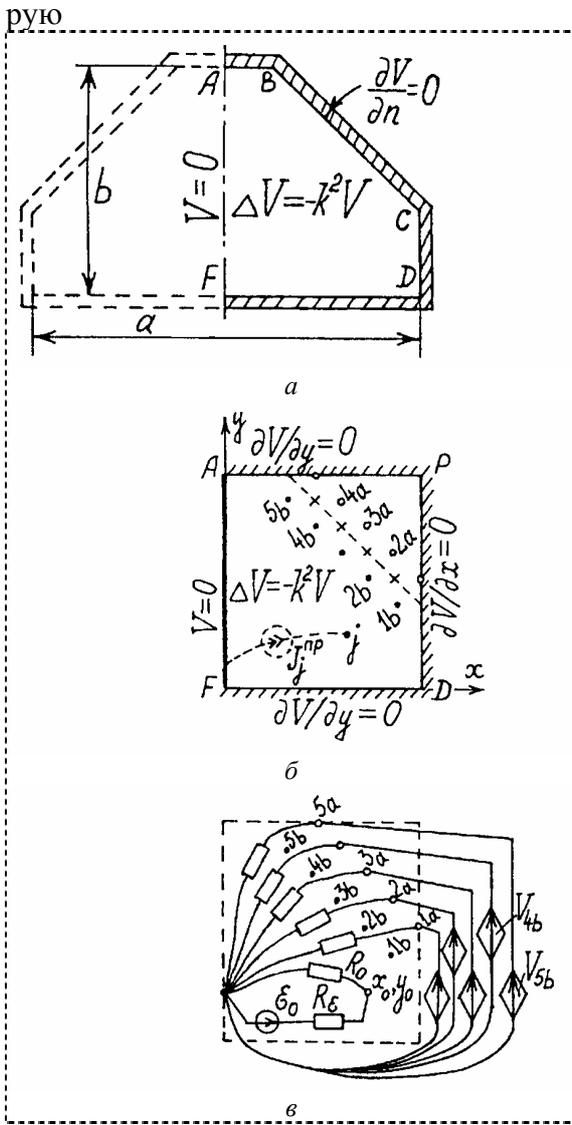


Рис. 11. Поперечное сечение волновода (а), расчетная область с граничными условиями (б) и объединенная расчетная схема (в)

ую по существу и выражаются параметры ЭМГЭ. В практическом отношении удобство использования понятия «фундаментальная область» заключается в возможности построения на основе одной и той же ФО решений для многих полевых задач, различающихся лишь формой внешней цепи, что может применяться, в частности, при оптимизации конструкций электромагнитных устройств. Этим обусловлено название рассматриваемого метода. Для одной и той же расчетной области могут быть использованы различные ФО. Выбор последней, как уже отмечалось выше, определяется возможностью получения функции Грина, удобной для расчета параметров ЭМГЭ. Кроме того, чем лучше ФО учитывает «геометрическую сложность» исходной расчетной области, тем потенциально точнее получаемое решение, поскольку разрушается меньшая часть границы исходной области и для ее восстановления требуется меньшее число граничных элементов. Соответственно уменьшается и порядок системы уравнений, формируемой и решаемой на заключительном этапе расчетов. С этой точки зрения использование в качестве фундаментальных бесконечных или полубесконечных областей может оказаться не выгодным, хотя фундаментальные решения для таких областей наиболее просты. И наоборот, попытка использования слишком сложной ФО может привести к практически необоснованным трудностям при определении параметров

ЭМГЭ и свести на нет достоинства рассматриваемого метода. В выборе «оптимальной» ФО может

помочь опыт решения полевых задач аналитическими методами.

Разработанные принципы построения диакоптической схемы замещения волновода с электрическими волнами проиллюстрированы на модельной задаче определения критиче-

ской частоты и критической длины волны наимизшего типа (*основной E-волны*) для полого симметричного волновода, сечение которого (рис. 10, *a*) имеет размеры $a=8$ см, $b=5$ см, $c=2$ см и $h=2$ см. В качестве ФО выбрана область, обеспечивающая наименьший порядок решаемой системы уравнений, каковой является прямоугольник. При разбиении «разрушаемых» участков контура сечения волновода (отрезков-следов внешней цепи) на $2 \times 3=6$, $2 \times 5=10$ и $2 \times 10=20$ элементарных участков результаты расчетов отличались не более, чем на 1,8%. Приведены также результаты расчета, полученные при использовании в качестве ФО полосы, полуплоскости и плоскости, а также значения критических параметров *E*-волн высших типов. Представлена процедура построения диакоптической схемы замещения волновода с магнитными волнами и пример определения критической частоты и критической длины магнитной волны наимизшего типа (*основной H-волны*) для полого симметричного волновода (рис. 11, *a*) с выбором в качестве ФО прямоугольника.

Полученные в диссертации результаты расчета критических параметров волн различных типов даже при грубом разбиении контура сечения волновода хорошо согласуются с результатами, полученными В.А. Говорковым и С.Д. Купаляном методом конечных разностей, превосходя их по точности при одинаковом порядке решаемой системы уравнений.

Цель пятой главы «Многовеерные схемы замещения для анализа динамики скин-эффекта в токоведущих системах импульсных электрофизических устройств» — расчет переходных процессов в токоведущих системах на основе веерных схем замещения, разработанных в первой главе. Для иллюстрации общей методологии вначале рассмотрен расчет электромагнитных процессов в однофазных токопроводах при подключении их к источнику э. д. с. Основные этапы алгоритма представлены на общем примере замкнутого на конце двухшинного токопровода, включаемого под постоянное напряжение U_0 (рис. 12, *a*). В этом случае веерная схема замещения токопровода имеет вид (рис. 12, *б*), система дифференциальных уравнений записана относительно токов ЭП, включая ток i_0 опорного ЭП.

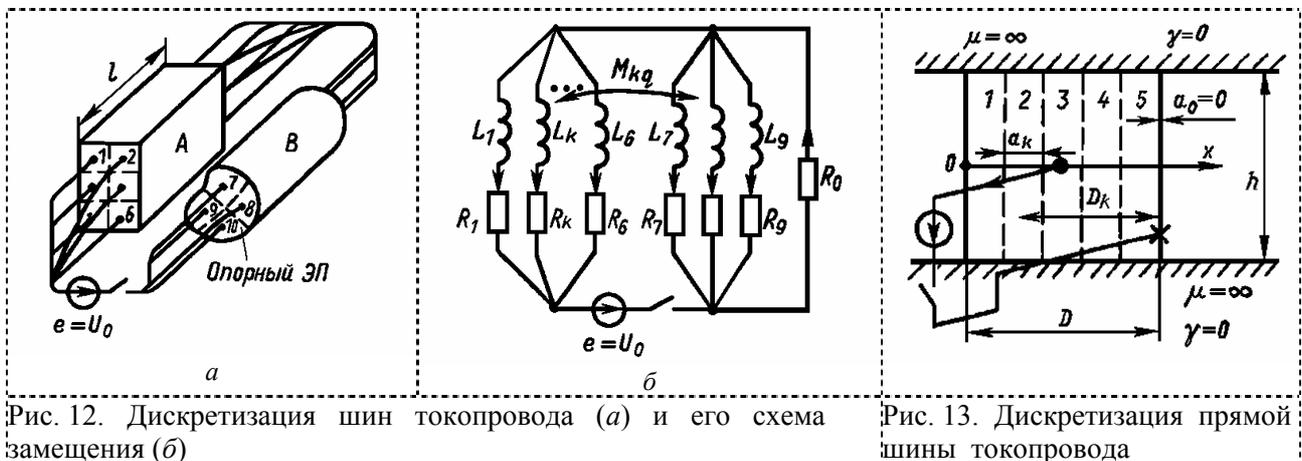


Рис. 12. Дискретизация шин токопровода (*a*) и его схема замещения (*б*)

Рис. 13. Дискретизация прямой шины токопровода

Достоверность и точность предложенных расчетных моделей и веерных схем замещения токопроводов при анализе переходного скин-эффекта проиллюстрирована применением их к решению одномерных задач с известными ответами в аналитической форме, одна из которых показана на рис. 13: двухпроводная линия, закороченная на конце, включается под постоянное напряжение; прямой провод (с током «на нас») — массивная шина с конечной удельной проводимостью γ , расщеплена на 5 ЭП; обратный провод — идеально проводящая пленка. Для надежного решения систем линейных дифференциальных уравнений составлены компьютерные программы, в которых реализованы системные методы численного решения уравнений состояния, разработанные профессором Ю.В. Ракитским. На рис. 15 сплошными линиями построены зависимости относительных плотностей тока, соответствующих серединам сечений 1-го и 5-го ЭП, и относительного тока в линии. Эти кривые практически совпа-

дают (отличие составляет $\sim 1-2\%$) с соответствующими кривыми, построенными с использованием точных формул.

Особый интерес представляет случай, когда в задаче, показанной на рис. 13, массивная шина (шина A) имеет бесконечную толщину: $D \rightarrow \infty$. При этом ток шины растет по закону

$$i(t) = \frac{2hU_0}{l\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{\gamma}{\mu_0}} \sqrt{t},$$

найденному профессором Г.А. Шнеерсоном. По такому же закону

должен практически изменяться ток и в шине конечной толщины D до тех пор, пока электромагнитная волна не достигнет края шины, т. е. до тех пор, пока плотность тока в точке $x=0$ не станет заметной величиной (например, $0,1\%$ значения плотности тока на поверхности шины при $x=D$). Это полностью подтвердилось при расчетах переходных процессов с помощью предложенных схем замещения для значений ширины шины, доходивших до $D=(100 \div 200)h$.

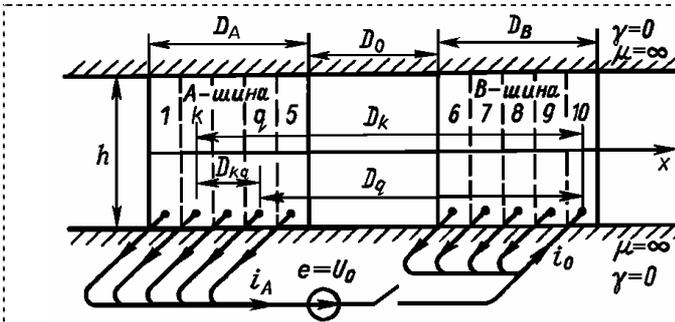


Рис. 14. Дискретизация шин токопровода с выбором опорного ЭП в шине B

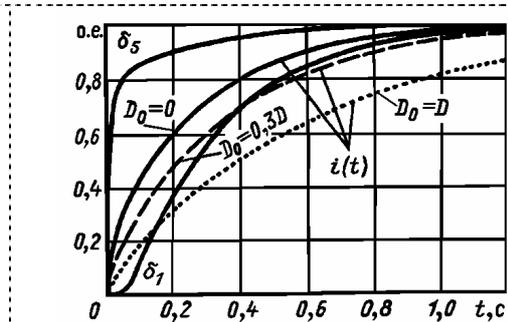


Рис. 15. Кривые переходных процессов в токопроводах (рис. 13 / δ / и рис. 14 / $i_A=i$ /)

На рис. 14 изображена еще одна короткозамкнутая ТВС, для которой также известно решение в аналитической форме. Характер переходного процесса в ней существенно зависит от ширины зазора между шинами D_0 . (см. на рис. 15 зависимости тока от времени, построенные штриховой и пунктирной линиями). Во всех случаях наблюдалось, что расщепление каждой шины на число ЭП свыше 5 практически не влияло на точность решения. Возможности разработанного алгоритма проиллюстрированы также на примере двумерной задачи, не имеющей решения в аналитической форме — рассчитан переходный процесс в неэкранированном токопроводе с шинами прямоугольного сечения. Для выполнения сравнительных расчетов использовалась задача о включении под постоянное напряжение замкнутого на конце токопровода с ленточными проводами, лежащими в одной плоскости — эта задача решалась ранее, в частности, профессором Э.В. Колесниковым и его учеником Д.Д. Саввиным с использованием разложения по собственным режимам токопровода.

Построение многомерной схемной модели для анализа переходных процессов в токоведущей системе с электрически изолированными подсистемами иллюстрируется на рис. 16. Система состоит из немагнитных токоведущих шин A и B , через которые источник питания $e(t)$ и емкостной накопитель C включаются на R, L -нагрузку, и немагнитного экрана S с конечной электрической проводимостью. Ключевой является идея о представлении шин и немагнитных экранов совокупностями УЭВ с обратными (опорными) ЭП для каждой электрически изолированной подсистемы. В системе (рис. 16, a) имеются две электрически несвязанные подсистемы и поэтому выделены два опорных ЭП. В качестве опорного ЭП в подсистеме может быть выбран любой ее ЭП. В подсистеме, образованной шинами A и B , опорный ЭП выбран в шине B и обозначен 0_B . Опорный ЭП изолированного экрана

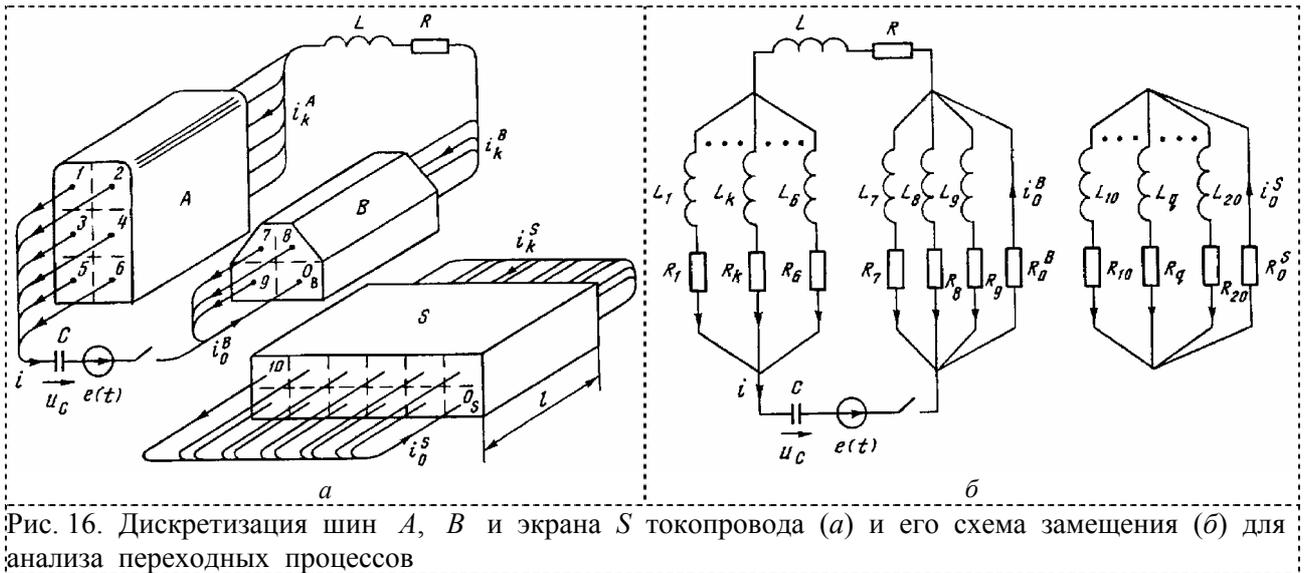


Рис. 16. Дискретизация шин A , B и экрана S токопровода (а) и его схема замещения (б) для анализа переходных процессов

S обозначен 0_S . Если число ЭП в шине A равно n_A , а в шине B — n_B , то число УЭВ в первой подсистеме будет $n_A + (n_B - 1)$. Число УЭВ реального экрана равно $n_S - 1$, где n_S — число ЭП в реальном экране. Все УЭВ индуктивно связаны между собой. Общее число УЭВ приближенной модели системы (рис. 16 а) равно $n = n_A + (n_B - 1) + (n_S - 1) = n_A + n_B + n_S - 2$. Нумерация УЭВ совпадает с нумерацией ЭП только в первой подсистеме. Описанным совокупностям УЭВ соответствует схема замещения, изображенная на рис. 16, б. Особенности подобных схем замещения являются наличие в них большого числа взаимоиндуктивных связей, а также возможность существования зависимых переменных состояния.

Формирование системы дифференциальных уравнений схемы замещения ТВС является центральной частью предлагаемого алгоритма, поскольку в результате решения этой системы в заданном интервале времени можно найти все характеристики переходного скин-эффекта, включая изменение во времени плотностей тока в шинах и экранах, тока нагрузки, магнитных потоков и электродинамических сил, действующих на шины и экраны. Ключевой идеей, облегчающей формирование уравнений схемной модели (рис. 16, б), является выбор при составлении уравнений по второму закону Кирхгофа таких контуров, каждый из которых содержит общую ветвь своей электрически изолированной подсистемы: R_0^B -ветвь для подсистемы шин A , B и R_0^S -ветвь для подсистемы экрана S . В итоге получена система уравнений относительно только переменных состояния: токов \mathbf{i}_A , \mathbf{i}_B , \mathbf{i}_S и напряжения u_C , для решения которой необходимо задать начальные значения переменных состояния. В частности, если рассматривается разряд конденсатора с начальным напряжением U_0 , то в системе уравнений следует положить $e(t)=0$ и принять $\mathbf{i}_A(+0)=\mathbf{0}$, $\mathbf{i}_B(+0)=\mathbf{0}$, $\mathbf{i}_C(+0)=\mathbf{0}$, $u_C(+0)=U_0$.

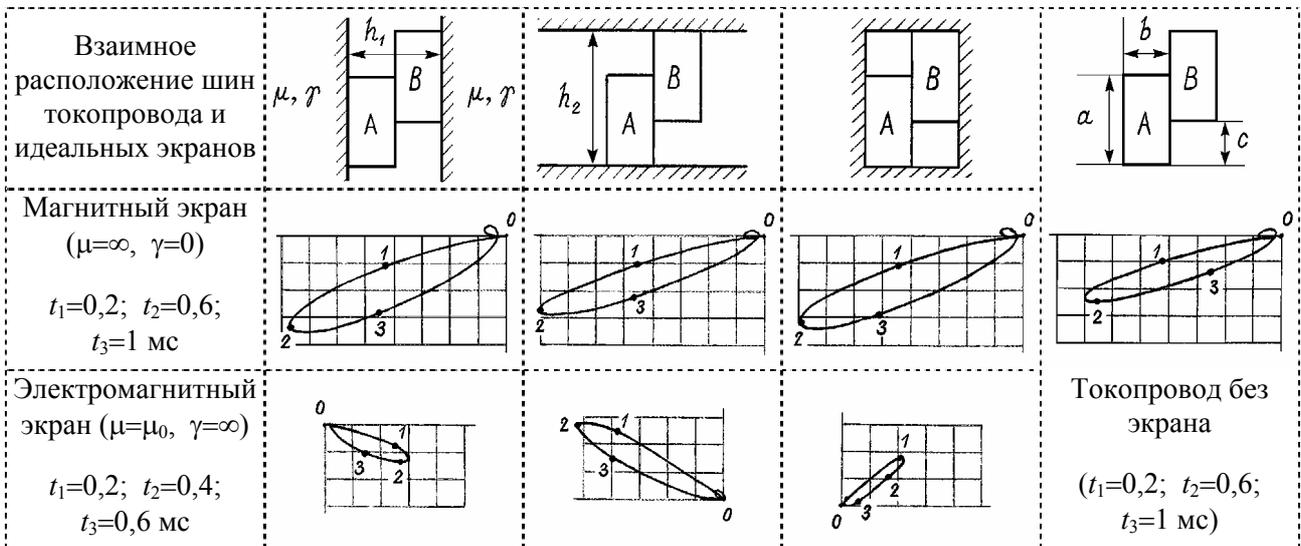
Результаты расчета, полученные при некоторой дискретизации поперечных сечений шин и немагнитных экранов, рекомендуется сопоставить с результатами решения задачи при расщеплении шин и экранов на большее число ЭП и т. д. до удовлетворительного совпадения сопоставляемых вариантов расчета. Очевидно, быстрота и надежность расчетов зависит от корректно выполненной начальной дискретизации поперечных сечений шин и экранов, для чего необходимы предварительные приближенные временные оценки характера диффузии электромагнитного поля в них.

Присутствие идеальных экранов вблизи ТВС не отражается на общем числе УЭВ модели системы, так как расщеплять их на ЭП не нужно. Однако собственные и взаимные индуктивности УЭВ, которым соответствуют L -элементы в схеме замещения (рис. 16, б), должны быть определены с учетом идеальных экранов. Из рис. 16, а следует, что в общем случае приближенная модель сложной ТВС содержит как соприкасающиеся, так и несопри-

касающиеся УЭВ. В дополнение к расчетным выражениям для индуктивностей, полученным в первой главе, выведены формулы для расчета взаимных индуктивностей неслепящихся УЭВ как в отсутствие, так и при наличии плоского идеального экрана.

Применение разработанных схемных моделей для расчета переходных процессов в цепях с токопроводами показано на нескольких простых примерах. Исследовался разряд емкостного накопителя C с начальным напряжением $u_C(0)=U_0$ на короткозамкнутую систему из двух немагнитных шин A и B . Соответствующая схемная модель получается из схемы на рис. 16, б путем устранения в ней источника э. д. с. $e(t)$, элементов нагрузки R и L , а также подсхемы, эквивалентной экрану S . Для приближенной оценки временной характеристики динамики скин-эффекта предложена методика, основанная на предположении, что скин-эффект в шинах выражен резко, а процесс разряда конденсатора является синусоидально затухающим с периодом T_0 . Отметим, что из приближенной схемы замещения следует, что характер переходного процесса определяется всей совокупностью собственных колебаний этой схемы, и потому понятие периода колебаний, вообще говоря, лишено смысла. Такой же условный характер имеет и понятие об эквивалентной глубине проникновения тока (толщине скин-слоя), которая вычислялась по формуле $\Delta_0 = \sqrt{T_0 / (\pi \mu_0 \gamma)}$. Знание величины Δ_0 позволяет выполнить корректную дискретизацию сечений шин на начальном этапе расчетов. С целью иллюстрации достоверности и точности предлагаемых схемных моделей вначале рассмотрена классическая одномерная задача о разряде конденсатора на идеальный бифиляр из короткозамкнутых шин, решение которой в аналитической форме представлено в известной монографии профессора Г.А. Шнеерсона. Зависимости тока разряда от времени, полученные численным расчетом и расчетом по формулам из монографии, практически совпали. Отличие действительного интервала первого колебания тока (с отрицательной и положительной полуволнами кривой) от условного периода T_0 составило 15%. Как и ожидалось, результаты расчетов практически не зависят от того, какой из ЭП выбран в качестве опорного. Эффективность разработанных схемных моделей проиллюстрирована также решением нескольких двумерных задач. Найдено изменение во времени электродинамических сил, действующих на шины и отдельные их элементы. В общем случае силы изменяются не только по величине, но и по направлению. В таблице показано влияние типа и геометрии идеальных экранов на годографы электродинамических сил, действующих на шину A при разряде емкостного накопителя на двухшинный токопровод, замкнутый на конце.

Годографы электродинамических сил, действующих на шину A (масштаб $m_f=4$ Н/клетка)



Методика построения схем замещения для исследования переходного скин-эффекта в ТВС с прямолинейными немагнитными шинами и экранами произвольного поперечного сечения обобщена на случай стальных шин, которые могут проходить вблизи стальных экранов и идеальных экранов. Магнитные проницаемости $\mu = \mu_r \mu_0$ (μ_r – относительная магнитная проницаемость) и удельные проводимости γ стальных шин и стальных экранов полагаются постоянными по их объемам. Для удобства шины и экраны именуется кратко *магнетиками*. ТВС может состоять из произвольного числа магнетиков с различными $\mu = \text{const}$ и $\gamma = \text{const}$ и *немагнетиков* ($\mu_r = 1$). Учет особых свойств магнетиков осуществлен на базе физических соображений, восходящих к идеям Ампера и позволяющих перейти к однородным в магнитном отношении средам. Процедура построения схемной модели и ее анализа рассмотрена на примере разряда емкостного накопителя C через токопровод с двумя прямолинейными шинами A и B (рис. 17, *a*). Однако, предложенная в работе методика легко обобщается на задачи с любым числом шин и экранов.

Переход от исходной области токопровода с магнетиками к однородной области без магнетиков назван *преобразованием Ампера*, а сама область токопровода, в которой все ма-

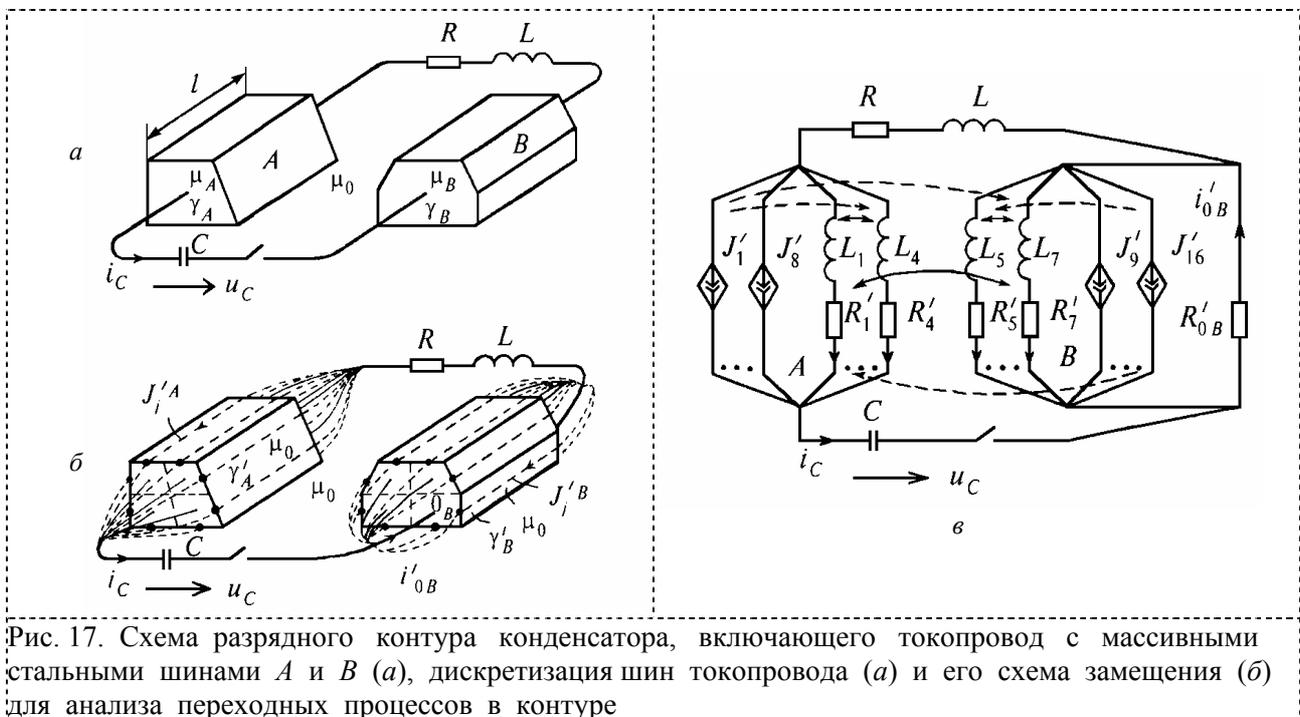


Рис. 17. Схема разрядного контура конденсатора, включающего токопровод с массивными стальными шинами A и B (*a*), дискретизация шин токопровода (*a*) и его схема замещения (*б*) для анализа переходных процессов в контуре

гнетики заменены немагнитными проводниками — *областью Ампера*. Принципиально важно, чтобы эта замена не повлияла на состояние цепи, в которую входит токопровод, что будет выполнено, если в пространстве, окружающем проводники токопровода, магнитное поле не изменится. В работе использовалось преобразование, инвариантное относительно распределения индукции во всей области токопровода. Перечислены свойства такого преобразования Ампера, непосредственно использованные для построения схемных моделей. Показано, что в области Ампера необходимо добавить поверхностные токи по периферии проводников, бывших магнетиками. Для получения приближенной схемной модели токопровода в области Ампера наряду с дискретизацией объемных токов необходимо выполнить также дискретизацию поверхностных токов, заменив их *поверхностными токовыми нитями*. Область Ампера, в которой шины стали немагнитными, показана на рис. 17, *б*, причем поверхностные нити с токами J_j^A A -шины и такие же нити с токами J_j^B B -шины изображены штриховыми утолщенными линиями. Как и прежде, используется ключевая идея о расщеплении шин на *объемные элементарные проводники* (ОЭП) и представлении электриче-

ски изолированных подсистем массивных проводников в области Ампера совокупностями *объемных элементарных витков* (ОЭВ) и *поверхностных элементарных витков* (ПЭВ) с одним *общим* для каждой электрически изолированной подсистемы обратным ОЭП. Общий ОЭП в системе из рассматриваемых двух шин обозначен 0_B . В схеме замещения (рис. 17, в) совокупность ОЭВ (рис. 17, б) изображена L, R -ветвями. Все L, R -ветви индуктивно связаны друг с другом, по ним протекают объемные элементарные токи (эти связи изображены на рис. 17, в сплошными стрелками). Элементарные токи поверхностных нитей удалось выразить через объемные элементарные токи так, что каждая поверхностная нить (рис. 17, б) представляется в схеме замещения зависимым источником тока, управляемым всеми объемными токами A - и B -шин (за исключением тока 0_B -ЭП). Эти источники изображены на рис. 17, в ромбиками. Вместе с тем, как следует из рис. 17, б, ток каждого ПЭВ индуцирует э. д. с. взаимной индукции во всех ОЭВ. На рис. 17, в эти связи отображены *односторонними* штриховыми стрелками (обратное индуктивное влияние на проводники с источниками токов бессмысленно).

Процедура расчета электродинамической силы, приложенной к магнетику, особенностей не имеет. В силу инвариантности электродинамической силы относительно преобразования Ампера, ее можно определить как с использованием тензора натяжений магнитного

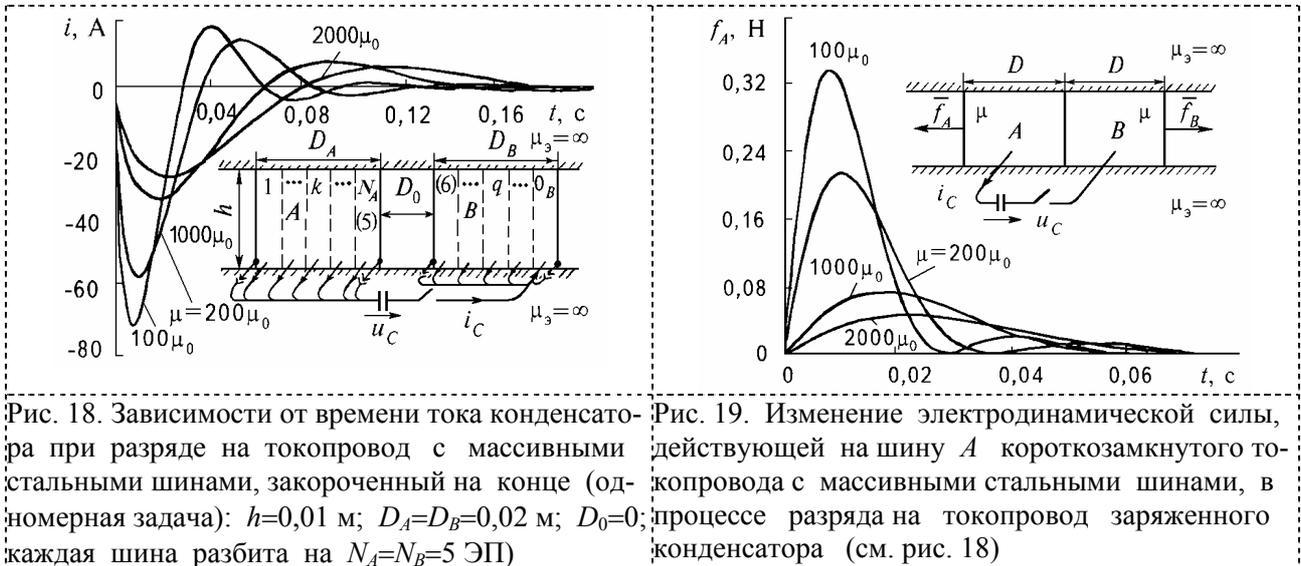


Рис. 18. Зависимости от времени тока конденсатора при разряде на токопровод с массивными стальными шинами, закороченный на конце (одномерная задача): $h=0,01$ м; $D_A=D_B=0,02$ м; $D_0=0$; каждая шина разбита на $N_A=N_B=5$ ЭП)

Рис. 19. Изменение электродинамической силы, действующей на шину A короткозамкнутого токопровода с массивными стальными шинами, в процессе разряда на токопровод заряженного конденсатора (см. рис. 18)

поля в заданной области, так и путем суммирования элементарных электродинамических сил, приложенных к объемным и поверхностным нитям токов проводника в области Ампера. Показано, что второй путь более экономичен по временным затратам. Некоторые характерные результаты расчета сил представлены на рис. 19.

Заключение

Работа посвящена важному научному направлению по развитию и совершенствованию электромагнитных расчетов электротехнических устройств с использованием новых схемных моделей, на основе которых разработаны эффективные методы, алгоритмы и компьютерные программы для определения параметров устройств и систем народнохозяйственного значения. К числу наиболее существенных относятся следующие результаты.

1. Разработан новый численно-аналитический метод анализа поверхностного эффекта в массивных прямолинейных проводящих элементах токоведущих систем — метод *верных схем замещения*. Метод основан на расщеплении проводящих элементов на элементарные проводники и введении удобного для построения наглядных расчетных моделей и схем

замещения токоведущих систем понятия *условного элементарного витка*. Построенные расчетные модели и схемы замещения ТВС имеют специфическую веерную структуру, что и послужило основанием назвать их *веерными схемными моделями*. Эти модели имеют различный вид в зависимости от того, заданы на входе ТВС токи или напряжения. Показано, что при известных токах в системе параметры искусственного обратного провода не входят в уравнения схемных моделей.

2. Доказано, что для расчета токораспределения с учетом поверхностного эффекта и эффекта близости в ТВС, окруженных идеальными экранами, могут быть применены методы функций комплексного переменного и техника конформных отображений расчетных областей. Доказательство основано на идее инвариантности индуктивностей весьма тонких витков при конформных преобразованиях. Установлены связи между индуктивностями УЭВ, рассчитанными при различных конформных отображениях расчетных областей и различных месторасположениях обратного проводника.

3. Введено понятие *бикомплексной* напряженности магнитного поля, удобное для вывода выражений электромагнитных сил, действующих на токонесущие шины и экраны ТВС с учетом поверхностного эффекта и эффекта близости. Полученные расчетные выражения были использованы для сравнительных расчетов и контроля результатов расчета сил с использованием еще одной методики, разработанной в работе.

4. Предложен простой алгоритм расчета электрических параметров трехфазных токопроводов, основанный на использовании веерных схемных моделей. Методика пригодна для эффективного определения параметров большинства выпускаемых отечественной промышленностью токопроводов и шинопроводов.

5. Разработана методика расчета сил тяги и левитации в электродинамических транспортных системах, позволяющая свести задачу по расчету вихревых токов в проводящих элементах транспортных систем и вызываемых ими электромагнитных сил к формированию и расчету простейших схемных моделей. Достоверность методики в рамках принятых допущений для плоскопараллельных электродинамических систем подтверждена удовлетворительным совпадением результатов расчетов и экспериментов.

6. Предложена *решетчатая цепно-полевая схема замещения* тонкой проводящей немагнитной оболочки, пригодная для расчета ее экранирующего действия не только в установившемся, но и в переходных режимах. В отличие от традиционных подходов, основанных на использовании интегральных уравнений для функций векторного или скалярного магнитных потенциалов или функции тока, рассчитываются реальные вихревые токи в оболочке с учетом их реакции. Результаты решения модельной задачи (тонкая пластина во внешнем поле) даже при невысокой степени дискретизации пластины хорошо согласуются с данными, полученными другими авторами, что свидетельствует об эффективности применения построенной схемной модели.

7. На основе общих идей диакоптики цепей и полей разработаны *диакоптические схемы замещения* для расчета критических параметров электрических и магнитных волн в полых волноводах, в отличие от «дифференциальных» моделей МКР и МКЭ отражающие общие свойства анализируемых подобластей, что позволяет рассматривать их как интегральные схемы замещения, удобные для выполнения практических расчетов.

8. Разработан эффективный численно-аналитический метод решения задач диффузии электромагнитного поля в массивные проводящие немагнитные и стальные (с постоянными магнитными свойствами) элементы токоведущей системы в двумерной постановке. Метод, основанный на использовании построенных *многовеерных схемных моделей* ТВС, позволяет выполнять анализ переходных процессов в электрических цепях, содержащих токопроводы с массивными проводящими элементами, при любой степени проявления поверхностного эффекта и эффекта близости в проводниках.

9. С использованием разработанных в диссертации методов и алгоритмов эффективно решены не только модельные задачи и задачи, решение которых классическими методами сопряжено со значительными трудностями, но и практически важные для электротехнической промышленности задачи определения электрических и электромагнитных характеристик мощных токопроводов и шинопроводов различных серий.

В целом создана методология построения наглядных расчетных моделей и электрических схем замещения различных электротехнических устройств и их конструктивных элементов, ориентированная на применение в виде инженерных методик и компьютерных программ электромагнитного расчета токоведущих систем, электромагнитных экранов и волноводов. Разработанные алгоритмы и программы расчетов нашли применение и внедряются в проектных организациях и конструкторских бюро отечественных промышленных предприятий. Материалы исследований отражены в ряде учебных пособий и используются в учебном процессе на кафедре теоретических основ электротехники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах.

1. Схемное моделирование конечных элементов и суперэлементов в декомпозиционных алгоритмах анализа электромагнитных полей / М.А. Шакиров, Р.П. Кияткин, Л.Я. Ладанюк, В.И. Яковлев // Математическое моделирование в энергетике: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф., г. Киев, 23-25 октября 1990 г.– Киев: ИПМЭ АН УССР, 1990.– Ч. 4.– С. 188-189.

2. Шакиров М.А., Кияткин Р.П. Алгоритм расчета критических параметров полых волноводов с использованием диакоптических схем замещения // **Радиотехника и электроника**. АН СССР.– 1991.– Т. 36.– Вып. 3.– С. 475-479.

3. Шакиров М.А., Кияткин Р.П. Диакоптика цепей и полей // *Elektrotechnicky Casopis*. – CSFR, Bratislava: Slovak technical university, 1991. – Roc. 42. – № 7-8.– Р. 426-429.

4. Шакиров М.А., Кияткин Р.П. Диакоптический подход к определению критических параметров волн в полых волноводах // **Радиотехника**. – 1991. – № 10.– С. 43-46.

5. Шакиров М.А., Кияткин Р.П. Применение интегральных схем замещения для определения критических параметров волн в сложных волноводах // **Техническая электродинамика**. АН Украины.– 1992.– № 2.– С. 3-7.

6. Шакиров М.А., Кияткин Р.П. Эффективный алгоритм расчета потерь в прямолинейных токовых волноводах при наличии магнитных экранов // Изв. ВУЗов и ЭО СНГ. **Энергетика**.– 1992.– № 7-8.– С. 34-40.

7. Shakirov M.A., Kijatkin R.P. Diakoptics and electromagnetic fields // The abridged versions of papers for presentation of int. conf. on electromagnetic field problems and applications «ICEF-92», China, Hangzhou, October 14-16, 1992.– Hangzhou: Zhejiang University, 1992.– Р. 86.

8. Шакиров М.А., Кияткин Р.П. Расчет вытеснения тока в короткозамкнутых кольцах ротора асинхронного двигателя методом функций комплексного переменного // **Электротехника**.– 1992.– № 10-11.– С. 8-12.

9. Шакиров М.А., Кияткин Р.П. Интегральные схемы замещения для определения критической длины поперечно-электрической волны наименьшего типа для полых волноводов сложной формы сечения // Сборник научно-методических статей по теоретическим основам электротехники. – М.: МЭИ, 1994. – Вып. 1.– С. 58-63.

10. Шакиров М.А., Кияткин Р.П. Метод анализа поверхностного эффекта в прямолинейных проводниках с учетом влияния идеальных экранов // **Электричество**.– 1994.– № 2.– С. 29-38.

11. Шакиров М.А., Кияткин Р.П. Учет влияния экранов на вытеснение тока в прямолинейных токоведущих элементах // Изв. РАН. **Энергетика**. – 1994. – № 5. – С. 116-124.
12. Шакиров М.А., Кияткин Р.П. Динамика образовательного стандарта по ТОЭ // Высокие интеллектуальные технологии образования и науки: Тез. докл. науч.-мет. конф., г. Санкт-Петербург, 31 января – 1 февраля 1995 г. – СПб.: СПбГТУ, 1995. – С. 177-178.
13. Практикум по ТОЭ.– Ч. 3.: Учеб. пособие / М.А. Шакиров, Р.П. Кияткин, В.С. Лопатин и др. / Под ред. М.А. Шакирова.– СПб.: СПбГТУ, 1995.– 168 с. (С грифом ГК РФ по высшему образованию).
14. Диакоптика электрических цепей и электромагнитных полей / М.А. Шакиров, Р.П. Кияткин, В.В. Филаретов, Жен Хунлин // Инновационные наукоемкие технологии для России: Тез. докл. Рос. науч.-техн. конф., г. Санкт-Петербург, 25-27 апреля 1995 г.– СПб.: СПбГТУ, 1995.–Ч. 2.– С. 81.
15. Shakirov M., Kijatkin R. Principle of correspondence between circuit and field diakovtics // The papers of Second Int. Conf. on Advanced Methods in the Theory of Electrical Engineering applied to power systems «AMTEE'95», Czech Republic, Pilsen, June 28-30, 1995. – Pilsen: University of West Bohemia, 1995. – P. 225-228.
16. Шакиров М.А., Кияткин Р.П. Схемы замещения для анализа переходных процессов в прямолинейных токопроводах с учетом поверхностного эффекта // **Электротехника**. – 1995. – № 12. – С. 19-23.
17. Математический фундамент диакоптики / Р.П. Кияткин, Жен Хунлин, М.А. Шакиров, Ю.И. Захарьящев // Высокие интеллектуальные технологии образования и науки: Тез. докл. III Междунар. науч.-мет. конф., г. Санкт-Петербург, 1-2 февраля 1996 г.– СПб.: СПбГТУ, 1996. – С. 35-36.
18. Шакиров М.А., Кияткин Р.П. Электродинамические усилия в экранированных токопроводах // Изв. ВУЗов и ЭО СНГ. **Энергетика**. – 1996. – №7-8. – С. 27-33.
19. Обновление содержания общепрофессиональных дисциплин / М.А. Шакиров, Р.П. Кияткин, Жен Хунлин, Ю.А. Майоров // Высокие интеллектуальные технологии образования и науки: Тез. докл. IV Междунар. науч.-мет. конф., г. Санкт-Петербург, 30-31 января 1997 г. – СПб.: СПбГТУ, 1997. – С. 140-141.
20. Кияткин Р.П., Шакиров М.А. Импульсные поля в курсе теории электромагнитного поля // Фундаментальные исследования в технических университетах: Материалы науч.-техн. конф. вузов-членов Ассоциации техн. ун-тов России, г. Санкт-Петербург, 16-17 июня 1997 г. – СПб.: СПбГТУ, 1997. – С. 28-29.
21. Шакиров М.А., Кияткин Р.П. Динамика скин-эффекта при разряде емкостного накопителя через прямолинейные шины // **Журнал технической физики**. – 1997. – Т. 67. – Вып. 7. – С. 1-7.
22. Шакиров М.А., Кияткин Р.П. Переходные процессы в токопроводах с массивными стальными шинами // **Электротехника**. – 1997. – № 10. – С. 40-47.
23. Шакиров М.А., Кияткин Р.П. Поверхностный эффект в прямолинейной токоведущей системе при разряде емкостного накопителя // Изв. РАН. **Энергетика**. – 1997. – № 6. – С. 111-123.
24. Кияткин Р.П., Модеров А.А., Шакиров М.А. Электромагнитная левитация в курсе ТОЭ // Высокие интеллектуальные технологии образования и науки: Тез. докл. V Междунар. науч.-мет. конф., г. Санкт-Петербург, 30-31 января 1998 г.– СПб.: СПбГТУ, 1998. – С. 131-132.
25. Шакиров М.А., Кияткин Р.П. Динамика электромагнитных сил при переходном скин-эффекте в прямолинейных шинопроводах // **Электричество**. – 1998. – № 4. – С. 62-69.
26. Кияткин Р.П. Электромагнитные расчеты многофазных токопроводов с использованием веерных схем замещения // Фундаментальные исследования в технических универси-

татах: Материалы науч.-техн. конф. вузов-членов Ассоциации техн. ун-тов России, г. Санкт-Петербург, 25-26 июня 1998 г.– СПб.: СПбГТУ, 1998.– С. 155.

27. Кияткин Р.П., Шакиров М.А. Электродинамические взаимодействия массивных экранированных проводников // *Фундаментальные исследования в технических университетах: Материалы науч.-техн. конф. вузов-членов Ассоциации техн. ун-тов России*, г. Санкт-Петербург, 25-26 июня 1998 г.– СПб.: СПбГТУ, 1998.– С. 200^a.

28. Кияткин Р.П. Динамический скин-эффект в токоведущих системах импульсных установок // *Фундаментальные исследования в технических университетах: Материалы науч.-техн. конф. вузов-членов Ассоциации техн. ун-тов России*, г. Санкт-Петербург, 25-26 июня 1998 г.– СПб.: СПбГТУ, 1998.– С. 237-238.

29. Кияткин Р.П., Шакиров М.А. Схемные модели для расчета критических параметров полых волноводов произвольной формы сечения // *Фундаментальные исследования в технических университетах: Материалы науч.-техн. конф. вузов-членов Ассоциации техн. ун-тов России*, г. Санкт-Петербург, 25-26 июня 1998 г.– СПб.: СПбГТУ, 1998.– С. 238-239.

30. Шакиров М.А., Кияткин Р.П. Веерные схемные модели для анализа левитации и тяги на переменном токе // *Proceedings of the 4-th Int. Conf. on Unconventional Electromechanical and Electrical Systems «UEES'99», Russia, St. Petersburg, June 21-24, 1999.– Szczecin: Technical University Press, 1999.– Vol. 2.– P. 443-448.*

31. Шакиров М.А., Кияткин Р.П. Расчет сил левитации и тяги электротехнических систем переменного тока применением веерных схем замещения // *«На рубеже веков: итоги и перспективы»: Тез. докл. Всерос. электротехн. конгресса с междунар. участием «ВЭЛК-99», г. Москва, 30 июня – 1 июля 1999 г.– Т. III.– С. 303-304.*

32. Шакиров М.А., Кияткин Р.П. Схемы замещения для систем левитации и тяги на переменном токе // *Электротехника*.– 1999.– № 8.– С. 11-19.

33. Shakirov M., Kiyatkin R. Electromagnetic forces in shielded AC busbars systems // *The papers of Forth Int. Conf. on Advanced Methods in the Theory of Electrical Engineering applied to power systems «AMTEE'99», Czech Republic, Pilsen, September 13-15, 1999.– Pilsen: University of West Bohemia, 1999.– P. В 39-В 42.*

34. Шакиров М.А., Кияткин Р.П., Кузнецов И.Ф. Расчет электромагнитных сил в электродинамических системах с использованием веерных схем замещения массивных проводников // *Изв. РАН. Энергетика*.– 1999.– № 6.– С. 104-117.

35. Кияткин Р.П. Внешнее поле и потери энергии в трубопроводе трехфазного кабеля // *Труды науч. чтений «Белые ночи в МАНЭБ», г. Санкт-Петербург, 1-3 июня 2000 г.– СПб.: Безопасность, 2000.– Секция «Электромагнитная экология».– С. 75-83.*

36. Шакиров М.А., Кияткин Р.П., Майоров Ю.А. Новые принципы теоретической электротехники // *Труды науч. чтений «Белые ночи в МАНЭБ», г. Санкт-Петербург, 1-3 июня 2000 г.– СПб.: Безопасность, 2000.– Секция «Электромагнитная экология».– С. 119-127.*

37. Шакиров М.А., Кияткин Р.П., Майоров Ю.А. Диакоптика в теоретической электротехнике // *Научно-технические ведомости СПбГТУ*.– 2000.– № 3.– С. 63-71.

38. Кияткин Р.П. Применение метода естественных витков для расчета немагнитных цилиндрических и сферических экранов // *Науч. чтения «Белые ночи»: Доклады междунар. экологического симпозиума, г. Санкт-Петербург, 4-6 июня 2002 г.– СПб.: Безопасность, 2002.– Секция «Электромагнитная экология».– С. 64-71.*

39. Шакиров М.А., Кияткин Р.П. Расчет вихревых токов в немагнитных экранирующих оболочках // *Науч. чтения «Белые ночи»: Доклады междунар. экологического симпозиума, г. Санкт-Петербург, 4-6 июня 2002 г.– СПб.: Безопасность, 2002.– Секция «Электромагнитная экология».– С. 105-113.*

40. Шакиров М.А., Кияткин Р.П. Вихревые токи в проводящих пластинах и оболочках // *Фундаментальные исследования в технических университетах: Материалы VI Всерос.*

конф. по проблемам науки и высш. шк., г. Санкт-Петербург, 6-7 июня 2002 г.– СПб.: СПбГПУ, 2002.– Т. 1.– С. 228-230.

41. Кияткин Р.П., Шакиров М.А. Электродинамика токоведущих систем электроэнергетических устройств // Теоретические и практические проблемы развития электроэнергетики России: Труды Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 100-летию со дня рождения академика Л.Р.Неймана, г. Санкт-Петербург, 27-28 июня 2002 г.– СПб.: СПбГПУ, 2002.– С. 256-258.

42. Кияткин Р.П. Схемные модели электротехнических устройств при изучении теории электромагнитного поля // Высокие интеллектуальные технологии и качество образования и науки: Материалы XI Междунар. науч.-мет. конф., г. Санкт-Петербург, 27-28 февраля 2004 г.– СПб.: СПбГПУ, 2004.– С. 306-307.

43. Кияткин Р.П. Расчет мощности потерь в трубопроводах многофазных кабелей с использованием схемных моделей // **Научно-технические ведомости СПбГПУ.**– 2004.– № 4.– С. 15-18.