

А. Е. КАПЛЯНСКИЙ

**Методика
преподавания
теоретических
основ
электротехники**

Второе издание,
переработанное и дополненное



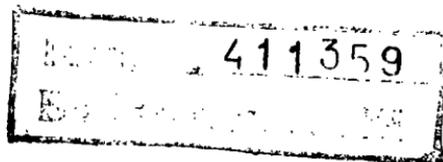
6П2.1
К20

Рецензенты:

Кафедра ТОЭ Московского института радиотехники,
электроники и автоматики

Докт. техн. наук, проф. К. М. Полыванов

Рекомендовано Учебно-методическим управлением по высшему образованию в качестве пособия для преподавателей высших учебных заведений.



Каплянский А. Е.

К20 Методика преподавания теоретических основ электротехники. Изд. 2, перераб. и доп. Учебно-методическое пособие. М., «Высш. школа», 1975.

143 с.

В книге излагаются психолого-педагогические основы преподавания, в том числе программированного обучения, и на этой базе — общая методика чтения лекций, проведения практических и лабораторных занятий, организация работы студентов и ее контроль применительно к технико-теоретическим дисциплинам.

После обзора содержания и построения учебников ТОЭ излагаются частные методики разделов этого курса на основе существующей программы с учетом новых направлений электротехники.

Приводятся конкретные указания о содержании лекций, лекционных демонстраций, практических и лабораторных занятий, курсовых работ и студенческих научных работ и рефератов.

Предназначается для преподавателей теоретических основ электротехники и аспирантов. Может быть полезна и преподавателям общинженерных дисциплин высших и средних специальных технических учебных заведений.

К 60406—334
001(01)—75 334—75

6П2.1

Учитель средней школы, помимо специальных знаний по преподаваемому им предмету, обладает необходимым комплексом знаний по педагогике и методике преподавания, полученным им в педагогическом институте. Преподаватель высшего технического учебного заведения, как правило, имеет только специальные знания. Он получает методическую подготовку лишь в процессе работы, используя отдельные указания заведующего кафедрой и старших товарищей, в основном же он учится на своих ошибках. При этом многие методические ошибки преподавателя не исправляются, а укореняются, процесс подготовки преподавателя затягивается.

Мы считаем, что начинающие преподаватели и аспиранты должны иметь хотя бы минимум знаний по психологии и педагогике, по общей методике обучения — дидактике, методике учебного процесса в высших технических учебных заведениях — проведению лекций, практических и лабораторных занятий, зачетов, экзаменов и т. д., а также по частной методике своего предмета — подбору материала и последовательности его изложения на лекциях, организации лекционных демонстраций, выбору задач для практических занятий, домашних заданий и для работы в лаборатории и т. д.

В этой книге автор делится почти 45-летним опытом преподавания теоретических основ электротехники, являющихся фундаментальным курсом для всех электротехнических вузов и факультетов. В книге сначала излагаются психолого-педагогические основы преподавания, включая программированное обучение, и методики проведения отдельных видов занятий; эта часть может быть полезной и для преподавателей других общинженерных дисциплин. Затем обосновывается оптимальное построение и даются частные методики отдельных частей курса теоретических основ электротехники в соответствии с новой программой 1971 г. и с учетом относительно малого числа часов, отводимых для его изучения в учебных планах многих вузов. Поэтому главное внимание уделено изучению основных, принципиально важных положений курса — сути явлений и методов их расчета. Вопросы, имеющие второстепенное значение для усвоения курса, не рассматриваются. Эта часть в основном отражает построение и содержание учебника теоретических основ электротехники автора настоящей книги с соавторами, второе издание которого выпущено издательством «Высшая школа» в

1972 г. Его объем примерно вдвое меньше известных учебников, содержащих, как известно, материал, выходящий за пределы студенческого учебника, необходимый, например, для сдачи кандидатского экзамена по теоретической электротехнике. Вместе с тем в нашем учебнике и в этой книге широко рассмотрены такие перспективные темы, как магнитогидродинамика и переходные процессы в электромагнитном поле (в программе требуется дать по ним только «понятия»), причем первую из них предваряет тема об электромагнитном поле в движущихся средах, отсутствующая в программе.

Рекомендации по преподаванию отдельных вопросов курса даны в краткой форме, если они совпадают с общепринятыми методами их изложения в большинстве учебников или сравнительно просты, и в более расширенном изложении по новым и трудным вопросам программы и если автором по уже известным вопросам даются новые методические рекомендации. Но учитывая значительную перегрузку курса по сравнению с числом часов, отводимых на него в учебных планах, в книге не даны рекомендации по вопросам, приведенным в программе, но являющимся предметом изучения других курсов, например высшей математики, технической электроники и основ радиотехники.

По сравнению с первым изданием настоящей книги добавлено «Введение», расширен материал, посвященный психолого-педагогическим основам преподавания, написаны новые главы — о программном обучении, о содержании и построении курса теоретических основ электротехники, о частной методике изложения введения, о параметрах электрических цепей и энергетических процессов в них, иначе изложены главы по частным методикам теории электрических и магнитных цепей постоянного и переменного токов, расширена глава о частной методике теории электромагнитного поля и уточнен остальной материал первого издания.

Общая и частная методики преподавания являются компетенцией различных научных школ и не должны быть унифицированы в обязательном порядке. Автор предлагаемой книги излагает свой опыт и взгляды. Многие положения являются дискуссионными. Однако автор надеется, что написанное им руководство будет способствовать улучшению методики преподавания и программы курса теоретических основ электротехники.

Автор благодарит за ценные советы и замечания по общей части книги проф. А. А. Люблинскую и педагога И. М. Клебанова, по специальной части — своих соавторов по учебнику теоретических основ электротехники 1961 г. и 1972 г. — проф. А. П. Лысенко и доц. Л. С. Полотовского, а также рецензентов — докт. техн. наук, проф. К. М. Поливанова и докт. техн. наук, проф. Л. А. Бессонова, канд. техн. наук, доц. И. Г. Демидову и канд. техн. наук, доц. М. Е. Заруди.

Мощное развитие в СССР энергетики, промышленности, строительства, транспорта, радио- и проводной связи, автоматики, вычислительной техники и т. д. немислимо без широкого использования электротехники, изучаемой в электротехнических втузах и факультетах, а в кратком виде — во всех остальных втузах. При этом базой всех специальных электротехнических дисциплин служит курс теоретических основ электротехники (ТОЭ). Уверенно владеть этими основами должен окончивший институт инженер-электрик для понимания, оценки и использования новых направлений электротехники, в том числе ее теоретических основ, например, в области прямого преобразования тепловой энергии в электрическую.

Важное значение курса ТОЭ в системе образования инженера-электрика подчеркивает создание при Министерстве высшего и среднего специального образования СССР Научно-методического совета по теоретическим основам электротехники и инженерной электрофизике, членами которого являются заведующие соответствующих кафедр втузов и другие специалисты. Этим Советом, в частности, разработана программа курса ТОЭ 1971 г.

Быстрое развитие новых направлений курсов, которые необходимо изучать в институте будущему инженеру-электрику при том же сроке обучения, заставляет сокращать число часов, отводимых на изучение традиционных частей курсов, в том числе ТОЭ, излагая и изучая этот и большой новый материал при том же числе часов. Поэтому актуальной становится задача рационализации преподавания большинства дисциплин. Это подчеркнул в своей речи 19 октября 1971 г. Л. И. Брежнев на слете студентов в Москве: «... оперативно и постоянно должна вестись и работа по дальнейшему совершенствованию содержания и методов преподавания в высшей школе». В газетах 30 июля 1972 г. было опубликовано Постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР «О мерах по дальнейшему совершенствованию высшего образования в стране», посвященное усилению подготовки студентов по научным и общетехническим дисциплинам, внедрению новых прогрессивных методов обучения студентов, развитию форм творческого овладения знаниями и глубокому изучению аспирантами методики преподавания в высшей школе. В «Основах законодательства Союза ССР и союзных республик о народном образовании», в разделе о высшем

образовании в числе главных задач вузов указаны постоянное совершенствование качества подготовки специалистов, подготовка научно-педагогических кадров и повышение квалификации преподавательского состава высших учебных заведений.

В свете сказанного выше о роли курса ТОЭ в системе образования инженера-электрика разработка методики преподавания этой дисциплины особенно актуальна. Этой задаче и посвящена предлагаемая книга.

В первую очередь необходимо было учесть особенности советской высшей школы, отражающиеся на постановке учебного процесса и методике преподавания. В большинстве вузов капиталистических государств к успехам студента относятся как к его личному делу, следствием чего является свободное посещение лекций и некоторых других занятий и возможность пребывания в вузе в течение времени, превышающем длительность учебного плана. В Советском Союзе работа высшей школы входит составной частью в план развития государства и его народного хозяйства. Поэтому социалистическое государство не может быть равнодушным к успехам студентов. Отсюда — обязательное посещение всех видов учебных занятий, необходимость сдачи в каждом семестре всех зачетов и экзаменов, входящих в его учебный план, соблюдение срока обучения, совпадающего с этим планом. А из всего этого вытекает необходимость систематической работы студентов наших вузов в течение всего учебного года.

Необходимо учесть, что молодежь, имея лишь опыт среднего образования, с трудом переживает смену методики преподавания, упуская драгоценное время не из-за недобросовестности, а по неопытности. Поэтому переход от школьной системы уроков, задаваемых и проверяемых каждый день, к посеместровой проверке знаний должен происходить постепенно. На младших курсах, где читаются теоретические основы электротехники, необходим ряд внутрисеместровых контрольных мероприятий: домашние задания с определенным сроком сдачи, контрольные работы, вызов к доске на практических занятиях, обязательная сдача отчетов по лаборатории на ближайшем занятии и даже, может быть, контрольные вопросы на лекциях. Наконец, последнее соображение: методика работы студента во вузе должна быть приближена к стилю работы инженера на заводе, в конструкторском бюро, в лаборатории и т. д., где ему отнюдь не представляется полная самостоятельность и бесконтрольность: он должен выполнять определенный план по существу и в срок, работать в коллективе под контролем своих руководителей. Обоснованная выше точка зрения автора о необходимости системы контрольных мероприятий и отражена в изложенной далее методике проведения отдельных видов учебных занятий.

Приведенные далее рекомендации требуют определенной организации учебного процесса: достаточного числа часов, отводимого на курс ТОЭ, оптимального распределения его между лекциями, практическими и лабораторными занятиями, рационально составленного расписания, обеспечивающего нужное соотношение между

этими видами занятий в течение всего семестра, наличия у студентов достаточного времени для систематической работы, надлежащего оборудования аудиторий и лабораторий.

В первой части книги изложен необходимый для преподавателей и аспирантов минимум знаний по психолого-педагогическим основам преподавания, определяющим методику обучения — дидактику. Затем даны сведения по методике учебного процесса во вузах, в том числе по программированному обучению, рекомендации по проведению лекций, практических и лабораторных занятий, зачетов, экзаменов и факультативной работы.

Вторая часть книги посвящена частной методике преподавания курса ТОЭ на основе ее первой части и изучения опыта построения этого курса ведущими кафедрами в СССР и за рубежом. Рассматривается содержание и последовательность изложения материала в учебниках и на лекциях, организация лекционных демонстраций, даются рекомендации по выбору задач для практических занятий, домашних заданий, работ в лаборатории, студенческих научных работ и рефератов, а также исследуются возможности программирования преподавания и программирования усвоения курса ТОЭ при очном и заочном обучении. При этом особое внимание уделяется использованию теоретических положений в соответствии с рекомендацией президента АН СССР М. В. Келдыша на том же слете студентов: «Необходимо, чтобы вузы не только закладывали прочный фундамент знаний, но и связывали их с практическим использованием, приучали бы студента к будущей работе, к активной творческой деятельности».

1. Психологические основы обучения

Психология — наука, изучающая объективные закономерности психики человека. К психике относятся чувства, мысли и психические свойства личности: интересы, способности, характер, темперамент и т. д. Психика есть свойства мозга — особым образом организованной материи.

Согласно ленинской теории познания — «теории отражения» — психика является отражением — познанием человеком предметов реального мира и объективно существующих связей между ними. Познательная деятельность человека начинается с ощущений и восприятий, дающих неполные знания о предметах и явлениях, т. е. с чувственного познания мира. Дальнейший путь — переход от чувственного к логическому познанию, от ощущения и восприятия — к мышлению, отражаемому в речи человека. Познание мира происходит в процессе учебной и трудовой деятельности, когда человек уточняет и обогащает свои знания о предметах и явлениях. Поэтому преподаватель любой науки, в том числе ТОЭ, должен знать основы психологии, которые помогут ему более продуктивно передать свои знания учащимся. Хотя в процессе психологической деятельности человека все перечисленные виды познаний тесно связаны между собой, далее они рассматриваются раздельно.

Ощущение — начальный психический процесс отражения отдельных свойств предметов или явлений реального мира, непосредственно воздействующих на органы чувств, например звука, цвета, температуры и т. п. Волевое усилие и концентрация внимания делают ощущения более точными, что должно быть использовано в преподавании.

Восприятие — процесс отражения предметов или явлений материального мира на основе ощущения их свойств. Но в отличие от ощущений, отражающих только отдельные качества предметов и явлений, восприятия дают человеку образ всего предмета, всего явления в целом, в многообразии его свойств и качеств. Образ предмета, возникающий в сознании человека при восприятии, включает в себя, кроме отражения отдельных его свойств, прошлый опыт человека, знания о данном предмете, отношение к нему; при этом мышление в процессе восприятия придает ему осмысленный характер. Это также должно быть использовано при преподавании,

в частности для развития наблюдательности и полезных навыков при преднамеренном активном восприятии.

Представление есть образ конкретного предмета в его отсутствии, основанный на прошлом опыте — восприятии. Представления служат материалом для процесса мышления; их создание также является задачей преподавателя.

Внимание — обязательное условие успеха любой работы, в том числе и учебной. Оно заключается в сосредоточении психической деятельности человека на определенных объектах с одновременным торможением действия всех других. Различают три вида внимания:

1. *Непроизвольное* — вызываемое, главным образом, внешними причинами: интенсивностью и новизной впечатлений, частой сменной, динамичностью и контрастностью их и т. п., а также некоторыми внутренними причинами, например, ожиданием событий или привычкой к рабочей обстановке.

2. *Произвольное* — это внимание волевое, сознательно вызываемое намерениями человека, часто связанное с преодолением трудностей.

3. *Вторичное непроизвольное* — возникающее на основе целенаправленности и стремления к работе; оно поддерживается активной мыслительной деятельностью.

Главным рабочим видом внимания должно быть вторичное непроизвольное внимание, активизируемое в основном непосредственным интересом к работе. Произвольное внимание вызывается сознанием необходимости в том или ином, иногда и неинтересном, труде. Оно более организовано, целеустремленно и устойчиво, но и более утомительно, чем непроизвольное. Оба вида внимания имеют свою ценность, оба важны в процессе обучения, так как дополняя друг друга, содействуют лучшему восприятию и сохранению устанавливаемых связей. Преподаватель должен быть требователен к студентам в отношении этих двух видов внимания к проводимым занятиям, а также использовать процесс непроизвольного внимания, как об этом будет сказано далее.

Очень важными свойствами внимания являются его устойчивость и объем. Основным условием сохранения *устойчивости внимания* является мыслительная активность и заинтересованность учащегося объектом внимания, например его изучение, сравнение с известным, о чем также должен позаботиться преподаватель. *Объем внимания* — это способность сосредоточения на нескольких объектах одновременно, например, способность одновременно слушать, понимать и записывать лекции.

Память — это психический процесс отражения прошлого опыта, заключающийся в запоминании, сохранении и последующем воспроизведении или узнавании того, что раньше воспринималось, переживалось, делалось. Существуют два способа запоминания:

1. *Механическое запоминание* — установление внешних и случайных связей в том же виде, в каком они воспринимались. При этом на первый план выдвигаются несущественные признаки пред-

метов или явлений, а сущность и значение их как бы отодвигаются на второй план. Например, в результате демонстрации на лекции резонанс напряжений запомнился по большому току в цепи и большим реактивным напряжениям.

2. *Смысловое запоминание* — установление более глубоких, внутренних, существенных связей, выдвижение на первый план сущности, значения запоминаемого. Например, резонанс запомнился как явление при совпадении частоты источника с собственной частотой цепи или как результат взаимной компенсации реактивных сопротивлений.

Вопрос *прочности усвоения* тесно связан с проблемой *забывания*. Даже отлично понятая и хорошо усвоенная лекция, прослушанная со вниманием и тщательно записанная, начинает частично забываться тотчас после ее окончания, например, как показано в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1

**Сохранение знаний при проработке хорошо осмысленного материала
(в процентах к проработанному материалу)**

Время	Основные положения	Отдельные положения
К концу 1-го дня	98	77
Через 3—4 дня	84	68
Через 10 дней	82	64
Через месяц	76	60

Забывание уменьшается и замедляется при *повторении* (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2

**Сохранение отдельных положений лекции без повторений и с повторениями
(в процентах к проработанному материалу)**

Сохранение знаний	К концу 1-го дня	Через 3—4 дня	Через 1 месяц	Через 6 месяцев
Без повторения	78	66	59	38
С повторением	88	84	71	60

Необходимо отметить, что материал, воспринятый механически, без осмысливания, забывается значительно быстрее. Активное повторение материала самими учащимися дает значительно больший эффект, чем пассивное выслушивание повторных лекций или повторное чтение книги. Опыты Института психологии Академии педагогических наук СССР показывают, что после двух восприятий (слушание или чтение определенного материала) и двух последующих активных воспроизведений (повторение вслух или повторная запись), причем восприятие и воспроизведение чередовались, количество воспроизводимого материала составило через час 75%, а по точности совпадало на 75,5%, через пять дней — соответственно 70

и 73,7%. В то же время после пассивного повторения в виде четырехкратного восприятия через час осталось в памяти только 52,5% (по точности — 65,6%), через пять дней — 22,5% (по точности — 31,3%).

Показателен также следующий эксперимент. Группе студентов прочитали восемь пар фраз на определенное орфографическое правило. Они должны были дома придумать еще по одной паре фраз на то же правило. На другой день была проведена внезапная проверка запоминания. Оказалось, что запоминание собственных фраз в три раза превышало запоминание фраз, зачитанных экспериментатором. Таким образом, активная работа даже при непреднамеренном запоминании дала значительно больший эффект, чем пассивное заслушивание.

По запоминаемому материалу память разделяется на следующие виды: наглядно-образная, словесно-логическая и эмоциональная, а по роли тех или иных органов чувств — на следующие типы: зрительную, слуховую и двигательную.

Очевидно, преподаватель должен учитывать особенности памяти, мобилизуя все виды и типы памяти, в основном смысловое запоминание, организуя активное повторение лекционного материала учащимися дома и на практических занятиях. При этом надо содействовать запоминанию основных и других важных положений изучаемого курса, забывание же его менее важных деталей может быть даже полезным, так как освобождает «место в памяти» для нового важного материала, а знание основного материала позволит самостоятельно восстановить забытый.

Мышление — это процесс отражения в сознании человека общих свойств предметов и явлений и нахождения связей и отношений между ними. Правильность познания проверяется практикой.

В. И. Ленин писал: «От живого созерцания к абстрактному мышлению и от него к практике — таков диалектический путь познания истины, познания объективной реальности» («Философские тетради», 1965, с. 152—153). Такое активное мышление состоит из ряда процессов.

1. *Анализ*, т. е. мысленное расчленение явления на составные части, признаки или свойства. Например, анализируя электромагнитное поле, рассматривают отдельно его электрическую и магнитную составляющие; анализируя электрическую цепь, определяют напряжения и токи ее ветвей.

2. *Синтез* — мысленное соединение простых и разрозненных элементов и признаков в сложный и целый объект, предмет, явление. Например, синтез электрической цепи — это выбор ее схемы и параметров, обеспечивающий заданный закон протекания процессов.

Анализ и синтез всегда выступают вместе: прежде чем синтезировать, надо проанализировать объединяемое. «Мышление состоит столько же в разложении объектов сознания на их элементы, сколько в соединении родственных между собой элементов в единство. Без анализа нет синтеза» (К. Маркс и Ф. Энгельс, соч., т. 20, с. 41). Например, рассматривая установку для повышения коэф-

фициента мощности, сначала производят анализ, определяя активные и реактивные мощности ее элементов, а затем синтез, находя полную мощность и коэффициент мощности всей установки. Применяя метод наложения в случае напряжения сложной формы, сначала используют анализ, разлагая кривую в ряд Фурье, и находят токи отдельных гармоник, а затем — синтез, определяя мгновенное и действующее значения тока цепи. На основе развития аналитико-синтетической деятельности мышления становятся возможными и ряд следующих мыслительных операций.

3. *Обобщение* — мысленное объединение многих или разных объектов по сходству или общности отдельных признаков или свойств на основе абстрагирования от несущественных. Примером обобщения могут служить общие методы расчета статических полей разной физической природы.

4. *Абстракция*, вернее абстрагирование или отвлечение — мыслительная операция, заключающаяся в выделении какого-либо одного или группы признаков, свойств или состояний предмета в качестве самостоятельного объекта осмысления. Например, интересуясь соотношением напряжений и токов в трансформаторе, можно отвлечься от деталей его устройства и даже от сути протекающих в нем процессов, мысленно заменив трансформатор эквивалентной схемой.

5. *Сравнение* между собой предметов и их признаков, т. е. установления сходства или различия, тождества или противоположности элементов сравниваемых объектов, а затем и объектов в целом. Например, сравнивая электрическое и магнитное поля, можно отметить разницу в их свойствах и сходство в методах расчета.

Эти мыслительные операции позволяют *классифицировать* предметы и явления по их существенным признакам (например, цепи с сосредоточенными параметрами и цепи с распределенными параметрами, установившиеся процессы и переходные процессы) и *систематизировать* их, располагая в рациональном порядке (например, рекомендуемый в этой книге план построения курса ТОЭ).

В результате мышления создаются *понятия*, т. е. обобщенные мысли о предметах или явлениях, раскрывающие их основную *сущность*. Понятие невозможно без слова, играющего в образовании и развитии понятия весьма существенную, оформляющую, роль. В зависимости от характера познаваемых явлений понятия бывают конкретные или абстрактные. Содержание понятия раскрывается в *суждении* из рассмотрения связей и отношений между предметами. Суждение также подтверждает или отрицает необходимость действия, т. е. активного вмешательства в явления мира. Суждения могут быть *аксиоматическими*, т. е. бесспорными, *ассерторическими*, т. е. требующими доказательства, и *проблематическими*, т. е. допускающими противоположные утверждения. Мыслительный процесс имеет проблемный характер, так как всегда направлен на поиски решения какой-нибудь задачи. Это придает всей умственной деятельности учащихся активный характер.

Из изложенного очевидна необходимость учета преподавателем как процессов мышления при построении своих лекций и других занятий, так и особенностей учащихся. Важно также развивать мышление учащихся для переходов от конкретных понятий к научным обобщениям.

Исключительное значение имеет при этом слово: речь преподавателя и ответы учащихся. Речь должна воздействовать своим идейным содержанием, понятностью и выразительностью, обращением к насущным интересам слушателей, искренностью и логичностью.

2. Задачи и принципы обучения

Педагогической наукой на основе опыта выработан ряд основных принципов обучения.

1. Нельзя учить людей наукам, не соблюдая *принципа научности*. Излагаемое должно быть не только строго научным, но и должно соответствовать уровню науки сегодняшнего дня. При этом главное внимание должно быть обращено на основные положения курса. Уделяя внимание проблематике науки, не следует, особенно на младших курсах, включать в обязательную программу подробное изложение еще не проверенных гипотез, пока еще не оправдавших себя на практике методов расчета и т. п. Принцип научности должен соблюдаться и при проведении практических занятий, где не исключена возможность соскальзывания на путь утилитарно-прикладного обучения. Это, конечно, никоим образом не означает, что нужно готовить отвлеченных теоретиков — теорию надо основательно знать, чтобы стать полноценным, хорошо квалифицированным практиком.

2. *Связь теории с практикой* является характернейшей чертой советской науки и дидактики. Диалектический путь познания от созерцания к абстракции и от нее к практике должен быть положен в основу методики обучения — от фактов к выводам, а от них — к практике, их подтверждающей, и к новым направлениям в практике на основе этих выводов.

3. *Сознательность и активность обучения*. Большое значение сознательного обучения, тесно связанного с требованием активности учащихся, подчеркнул в своем выступлении на III съезде комсомола В. И. Ленин. Он говорил: «... на место старой учебы, старой зубрежки, старой муштры мы должны поставить умение взять себе всю сумму человеческих знаний, и взять так, чтобы коммунизм не был бы у вас чем-то таким, что заучено, а был бы тем, что вами самими продумано, был бы теми выводами, которые являются неизбежными с точки зрения современного образования» (Полн. собр. соч., Изд. 5-е, т. 41, с. 306).

Предварительным условием целенаправленности работы учащихся является ознакомление их с содержанием курса, предмета или темы. Показывая весь объем годового курса, преподаватель дает студентам определенную перспективу, указывает, чем они должны овладеть. Анализируя затем содержание темы, расчленяя

ее по разделам, выявляя связи между разделами, преподаватель тем самым уточняет частные задачи учащихся по овладению темой и подводит базу для организации учебной работы.

Активное участие в педагогическом процессе делает последний личным, кровным делом студента. Он добивается улучшения хода учебы, самостоятельно организует свою учебную работу и постепенно рационализирует ее методы. Благодаря этому усвоение значительно улучшается и углубляется, так как активизируются процессы мышления и повышается внимание. Без активности в работе нет внимания, значит нет и точного восприятия, надежного запоминания, прочного сохранения знаний. При проведении мероприятий по повышению активности приходится учитывать то обстоятельство, что формы обучения, применяемые в вузах, далеко не равноценны с точки зрения разбираемой проблемы. Лабораторные занятия, учебная практика, проектирование и т. п. по характеру своему требуют активности всех участников, и только люди с исключительно замедленной реакцией мысли или откровенно нежелающие учиться могут оказаться пассивными в ходе этих работ. На практических занятиях, семинарах, коллоквиумах и т. п. достаточную активность проявляет обычно только часть студентов и от преподавателя требуются значительные усилия для вовлечения всех остальных учащихся в активное обсуждение темы. Помимо обеспечения высокого уровня самих занятий, здесь полезно обращаться к наиболее пассивным учащимся с вопросами или предложением высказаться, выдвигать дискуссионные темы с опросом мнений каждого и т. д.

Наиболее трудной для активизации студентов является лекция. Необходимо возбудить интерес студентов и контролировать их внимание и понимание. Кроме того, рекомендуется наиболее пассивных из них сажать в первые ряды аудитории, проверять их записи, привлекать их в помощь преподавателю для показа пособий. Иногда полезно в ходе лекции обращаться непосредственно к такому слушателю или даже задавать ему вопросы.

4. *Систематичность и доступность изложения.* Обучение не может сводиться к беспорядочному усвоению случайных понятий. Курс лекций должен быть построен систематично. Это относится и к другим видам учебных занятий. В основу построения курса должна быть положена методология каждого предмета, порядок изложения его, система знаний, заложенная в нем. Учащимся должны быть ясны связи между отдельными разделами курса и между теорией и практикой. Иногда «логика науки» и «логика учебной дисциплины» расходятся и преподавателю приходится разумно сочетать то и другое. Только строго систематический ход мышления, последовательный переход от одного мыслительного процесса к последующему обеспечивает положительный результат работы. Студенты должны приучаться не схватывать отдельные факты, а усваивать знания организованно и систематически. Отец русской педагогики К. Д. Ушинский писал: «Голова, наполненная отрывочными бессвязными знаниями, похожа на кладовую, в которой все в беспорядке и где сам хозяин ничего не отыщет» (Избр. соч., т. II, стр. 19).

Нельзя считаться только со своим уровнем знаний, как это делают иногда неопытные преподаватели, излагая новые положения, неизвестные термины, непонятные схемы, никак не связанные с имеющимися у студентов знаниями, не находящие «опор» в их памяти. Надо знать свою аудиторию и отдельных студентов. Это позволит более точно подбирать материал, обнаруживать ошибки учащихся и свои, как преподавателя, и столь же своевременно исправлять их. Следует отметить, что индивидуальный подход к студентам позволит сильнее нагружать наиболее способных, найти способы подтягивания отстающих и этим повысить успех занятий в целом.

Опыт преподавания зафиксирован в четырех древних «правилах обучения». Эти правила, созданные эмпирическим путем, могли стать научно обоснованными сравнительно недавно. Вот они:

- 1) от известного к неизвестному;
- 2) от близкого к далекому;
- 3) от простого к сложному;
- 4) от конкретного к отвлеченному.

Первые два правила очень просто объясняются ассоциативным характером памяти. «Известное» выражает те «опоры» из имеющихся представлений, на которых строятся новые. Движение от «близкого» к «далекому» вполне обосновано учением о проторенных в сознании путях от одних представлений или понятий к другим, близким им по смежности, по сходству или по контрасту.

Третье правило говорит о последовательности обучения. Путь от хорошо усвоенного (отчего оно и стало простым) к новому, сложному, не так прост. К тому же нельзя добиваться чрезмерного облегчения обучения. Нельзя забывать, что учение — это всегда труд. И чем больше труда вложено в учение, тем выше его результаты, как во всякой другой работе. «В науке нет широкой столбовой дороги, — писал Маркс, — и только тот может достигнуть ее сияющих вершин, кто, не страшась усталости, карабкается по ее каменистым тропам» («Капитал», предисловие к французскому изданию). Задача преподавателя — не столько облегчить этот труд, сколько рационализировать его, сделать более продуктивным.

Опытные педагоги применяют очень успешно метод «барьеров». В обучении они последовательно ставят перед учащимися задачи и контролируемые усвоение вопросы все увеличивающейся сложности, заставляя их трудиться в полную меру своих возможностей, постепенно усиливая нервное напряжение учащихся в тренируя их на этом. Например, после изложения особенностей соединения приемников в трехфазных системах в звезду и в треугольник, спросить у слушателей: «А как надо соединить три разных однофазных приемника, рассчитанных на работу при одинаковом по величине напряжении, в звезду или в треугольник?» невнимательный учащийся может порекомендовать звезду, так как это повысит линейное напряжение в $\sqrt{3}$ раз, что весьма выгодно, а внимательный скажет, что в данном случае это использовать нельзя, так как приведет к разным по величине напряжениям на приемниках, что недопустимо.

Следующий вопрос: «А как все же можно использовать преимущества звезды?» — должен вызвать правильный ответ: «Применить звезду с нулевым проводом». Преодоление «барьеров» дает большое моральное удовлетворение, содействует повышению активности учащихся, а также позволяет преподавателю контролировать успешность усвоения материала.

Четвертое правило «от конкретного к абстрактному» соответствует ходу мыслительных процессов «от живого созерцания к абстрактному мышлению», например, от отдельных фактов к общим законам.

Все эти правила характеризуются одной общей чертой. Указывая ряд путей обучения, они все требуют постепенного движения по лестнице знаний без перескакивания, без пропусков и провалов, которые в дальнейшем так тормозят ход учения. Выполнение этих правил, ясное и глубокое знание методологии предмета, учет уровня знаний своей аудитории и использование его для облегчения мышления учащихся, создание «опор» для запоминания обеспечивают доступность знаний и успех обучения.

5. *Наглядность в обучении.* На лекции и семинаре, где объектом восприятия является слово, где преподаватель и учащийся имеют дело с абстрактными категориями, наглядные пособия не только иллюстрируют создаваемые в ходе учебы понятия, но и конкретизируют их. Исключительно полезны лекционные демонстрации опытов, иллюстрирующих теорию. Так как всякое познание начинается с «живого созерцания», то приближение к реальному предмету облегчает усвоение. С другой стороны, в наглядных пособиях можно выделять существенные признаки предмета, применяя цветные схемы, закрасив разным цветом нужные детали, используя укрупненные макеты или модели и т. п. Большое преимущество наглядных пособий заключается, во-первых, в том, что они запоминаются с помощью зрительной и двигательной (ощупывание предмета, сборка, разборка его) памяти и, во-вторых, потому, что процессы мышления здесь более просты и конкретны. В тех случаях, когда студенты изучают приборы, машины и т. п., пособия воспроизводят образ изучаемого предмета, приближают его к учащемуся, исправляют неточность представления о нем. Вместе с тем любое наглядное пособие требует словесного сопровождения, которое должно быть ярким и образным.

6. *Прочность и точность усвоения.* Выполнение указанных выше дидактических принципов обеспечивает точность усвоения, а использование приведенных выше свойств памяти — прочное запоминание пройденного. Нельзя, однако, думать, что самое тщательное доведение учебного материала до сознания студента или добросовестное чтение учебника полностью обеспечивает точное усвоение материала, гарантирует от ложного понимания его и освобождает от влияния прежних неправильных представлений. Необходимо всегда помнить о том, что каждый учащийся по-своему поймет и осмыслит слова лектора и содержание учебника и что это его понимание часто резко отличается от сути изложенного в лекции или

учебнике. Конечно, в ряде случаев играет роль и простое непонимание, зависящее от невнимания студента, слабой его подготовки или неудачного изложения лекции, сложности формулировок учебника и т. д. Поэтому постоянная проверка, контроль того, как поняты изложенные положения темы, — обязательное условие обучения. Семинары, коллоквиумы, а также постоянная проверка на практических занятиях, помимо зачетов и экзаменов — вот основные методы борьбы за точность и прочность усвоения. При этом надо избегать подробного «разжевывания» материала преподавателем, так как оно устраняет самостоятельную доработку материала учащимся.

3. Роль и задачи преподавателя

Преподаватель, опираясь на приведенные в п. 1 этой главы психолого-педагогические основы преподавания, должен строго вести учащихся по ходу излагаемой темы, активизируя процессы мышления, анализируя и синтезируя материал, пользуясь сравнениями, классификациями и систематизацией, показывая ход обобщения и абстракции, вырабатывая последовательно ряд представлений и понятий. Этим преподаватель не только дает учащимся ту или иную систему знаний, но и учит их рассуждать научно, последовательно, обоснованно-строго и объективно. Тут возможны два пути. Путь *индукции* — от частного к общему и путь *дедукции* — от общего к частному.

Вот примерный план лекции, построенной в основном на индукции:

1. Сообщить отдельные факты, процессы, предметы для наблюдения и осмысливания.

2. Указать, какие общие и специфические моменты их должны быть выделены; что относительно их уже известно и что является новым.

3. Показать, какое индуктивное умозаключение должно быть построено и как оно должно быть оформлено.

4. Дать дополнительные сведения, содействующие формированию мыслительного навыка индукции.

5. Для обобщения метода привести дедуктивные умозаключения по определению отдельных фактов, процессов, вещей на основе полученных индуктивным путем общих законов и правил.

Такой же план на основе дедуктивного метода:

1. Сообщить общий закон, правило или понятие.

2. Добиться понимания его учащимися.

3. Показать применение его для объяснения единичных случаев.

4. Провести возможно более полную конкретизацию и иллюстрацию.

5. Показать ценность выводов, основанных на дедукции.

6. Дать задание на решение разных задач с помощью дедукции.

7. Для обобщения метода показать, как индуктивным путем был получен ряд известных законов, правил, понятий.

В практике обычно применяются и тот и другой методы вместе. Так, при индуктивном методе бывает очень полезным указать в начале занятия законченные выводы по теме, или правила, или закон с тем, чтобы дать этим учащимся ясную целевую установку. Как показал ряд экспериментов, точная и ясная установка резко повышает длительность, точность и полноту запоминания и обеспечивает четкую целенаправленность действий, способствует организованности любой работы и мышления.

Обучение дает учащимся не только знания, но и развивает их ум, совершенствует их мышление. Преподаватель должен формировать следующие качества мышления:

1. Содержательность — в противовес бедности.

2. Глубину — в противовес поверхностности.

3. Широту — в противовес узости, хотя так называемые «узкие специалисты» могут в своей области мыслить и глубоко и содержательно, а широта может превратиться в дилетантизм (обо всем понемногу и ни о чем хорошо).

4. Обоснованность и доказательность — в противовес догматизму.

5. Способность и к абстракциям, и к конкретизации.

6. Самостоятельность и инициативность — умение человека ставить себе задачи и искать своих путей для их разрешения. Несамостоятельно мыслящий человек способен решать лишь задачи, поставленные другими, по готовым схемам.

7. Гибкость — в отличие от инертности. Гибкий ум свободен от предвзятых мнений, шаблона и трафарета.

8. Критичность — умение оценивать, проверять как свои, так и чужие мысли.

9. Быстрота мысли (но отнюдь не торопливость ее).

Так как правильная мысль проявляется лишь в правильном языковом изложении, немаловажной задачей преподавателя является развитие речи студентов, обучение их грамотному, логичному и правильному изложению своих мыслей, тем более, что это повседневно необходимо в их будущей практической деятельности.

В процессе обучения преподаватель мобилизует у студентов прежде всего смысловой способ запоминания и все типы памяти. Стройная, логически обоснованная система изложения материала, выделение главного и существенного на первый план, тщательное разъяснение трудного материала содействуют установлению у слушателей смысловых связей. Возвращение к некоторым наиболее существенным моментам в уже пройденном материале заставляет учащихся повторять и этим укреплять усвоенное. Не следует предлагать запоминать что-либо механически до последнего разъяснения, так как изложенное долго держаться в памяти не будет. Повторения следует учитывать в годовом плане курса, вводя в него занятия по повторению в том или ином варианте (семинары, повторение темы на лекциях и практических

занятиях и т. п.) или отводя в ряде занятий часть времени на повторение. Доказано, что повторение с перерывами более эффективно, чем повторение без перерывов. Желательно, чтобы преподаватель на каждом занятии, не нарушая хода изложения, повторял некоторые старые положения, связав их с новым материалом. Эти повторения необходимы и для создания «опор» для последующего запоминания.

Надо быть очень осторожным, чтобы не допустить закрепления неправильных, петочных и ложных знаний и точек зрения, так как изменять их, т. е. ломать уже установившиеся связи, значительно труднее, чем создавать новые.

Опытный преподаватель пользуется всеми особенностями внимания учащихся. Создавая у студентов понимание необходимости выполнять так называемую скучную или утомительную работу, заинтересовывая их в ее результатах, преподаватель активизирует и облегчает трудное произвольное внимание учащихся. Это тем более важно, что совершенно невозможно и педагогически нецелесообразно направлять внимание студентов только на интересное и занимательное.

Опытные педагоги умело пользуются также непроизвольным вниманием, возбуждая его неожиданными сообщениями, своеобразными оборотами речи и даже переменной силы голоса. Непроизвольное внимание, возбужденное в начале занятия, легко переходит затем в произвольное. И, наоборот, разрядка в момент утомления аудитории сводится к переводу «трудного» произвольного внимания в более легкие непроизвольные виды внимания.

1. Общие сведения

Появление и разработка за рубежом и у нас программированного обучения объясняется двумя основными причинами:

1. Резко увеличивается объем научной, а следовательно, и учебной информации — только за послевоенный период был более чем удвоен объем научных знаний, доставшийся людям за 10—12 тысяч лет культурной истории человечества.

2. Резко увеличивается число учащихся из-за непрерывного возрастания населения земного шара и его «омоложения». Так, с 1930 по 1960 г. население Земли возросло с двух миллиардов до трех, а к концу столетия увеличится еще на четыре миллиарда, причем из этих 7 миллиардов около 70% будет составлять молодежь в возрасте до 25 лет. Одновременно растет объем необходимых для изучения знаний.

Используя самообучение и самоконтроль, программированное обучение должно рационализировать учебный процесс, повысить его к. п. д., что позволит студенту за то же время изучить больший материал, а преподавателю охватывать на каждом занятии большее число учащихся.

Суть программированного обучения состоит в разделении учебного материала по изучаемому предмету на большое число малых порций — кадров, содержащих каждый одну логическую единицу, например один из методов расчета цепей постоянного тока: Освоение учащимися каждого кадра немедленно проверяется по его ответу на вопрос и в положительном случае учащийся переходит к изучению следующего кадра. Таким образом, проверка результата работы учащегося происходит немедленно, а не в конце семестра или в конце изучения данной дисциплины, т. е. осуществляется полезная «обратная связь». При этом происходит индивидуализация обучения — хотя бы в отношении времени, затраченного на ответ, а проработка каждого кадра и ответа по нему способствует лучшему запоминанию материала.

Как видно из изложенного, в программированном обучении можно выделить две стороны, по существу являющиеся этапами обучения — *программирование преподавания* и *программирование изучения*.

Во всех известных методах программированного обучения по изучаемой дисциплине составляются программированные учебные материалы, состоящие из кадров, вопросов по ним и ответов.

При этом содержание кадров может быть изложено полностью — тогда это будет программированный учебник, но можно ограничиться ссылками в каждом кадре на разделы обычного, непрограммированного учебника.

Вопросы по кадрам должны охватывать их суть, чтобы правильные ответы по ним свидетельствовали о надлежащем усвоении каждого кадра. Что же касается ответов, то тут предложены и используются два направления.

1. *Линейная программа* — простановка пропущенных слов в готовом ответе или составление всего ответа в письменной форме с последующим сравнением с правильным.

2. *Разветвленная программа* — нахождение правильного ответа из данных 3—5 ответов, из которых только один правильный.

Программированное обучение может осуществляться с помощью обучающих машин и без них. При *безмашинном* программированном обучении упомянутые выше программированные учебные материалы издаются в виде книг, содержащих покадровое изложение всего материала или ссылки на разделы учебника, а также вопросы и ответы на них; при *машинном* — используются многочисленные типы машин, в том числе подобные телевизорам, которые используются для показа и изложения материала кадров, вопросов и ответов на них. В машину закладываются правильные ответы, и учащийся, нажав соответствующую кнопку, может узнать, правилен ли его ответ. Более простые машины предназначаются только для проверки правильного усвоения, когда машина должна дать ответ: «да» или «нет».

Таким образом, из изложенного видно, что программированное обучение может осуществляться без преподавателя, хотя в многочисленных работах по этому вопросу говорится, что преподаватель необходим для организации, помощи и консультаций учащимся при таком обучении.

При программированном преподавании учащийся получает информацию по изучаемому кадру в программированном руководстве или от обучающей машины. Однако обязательно участие преподавателя для правильной организации обучения, консультаций и контроля; при этом все же не будут использованы все возможности преподавателя.

Программированием только изучения, рекомендуемого далее для вузов при изучении теоретических основ электротехники, рационализируется процесс усвоения при сохранении традиционного метода преподавания. Поэтому существо работы преподавателя на лекциях, практических и лабораторных занятиях и т. д. остается тем же.

Область применения программированного обучения чрезвычайно широка, начиная с дошкольников и кончая студентами вузов, а также рабочими и мастерами при профессиональном образовании, обучении обслуживания механизмов, при очном, заочном и вечернем обучении и т. д. Во всем мире вышли в свет сотни статей и книг, посвященных теории и практике программирован-

ного обучения (например, [1]), тысячи учебных программ и сотни типов обучающих машин.

Очевидно, что для разных назначений программированного обучения должен быть разный подход к теории и практике его применения; в дальнейшем рассматривается только его использование для обучения во втузах общинженерным дисциплинам на примере ТОЭ.

2. Программированное обучение общинженерным дисциплинам во втузах

Современное преподавание и изучение общинженерных дисциплин во втузах базируется на двух опорах: авторитетном лекторе и на написанном или принятом им учебнике.

Лекции должны быть красочны, отражать последние достижения науки и самого лектора, сопровождаться интересными демонстрациями, а также учитывать реакцию слушателей: отвечать на их вопросы, давать дополнительные разъяснения и сведения по изложенному материалу. Поэтому отказ при очном обучении от общения студентов с авторитетным лектором — энтузиастом своей науки, замена такой лекции самостоятельным изучением отдельных тем представляется нерациональным.

По отдельным фундаментальным наукам, в том числе и ТОЭ, в СССР выпущено по несколько учебников разных научных школ. Конечно, они используются при разделении их текста на кадры или для составления таких кадров, но при этом исключается необходимый подход к учебнику, как единому целому, затрудняется использование предыдущего его материала, что часто необходимо для понимания текущего кадра. Не надо также забывать, что учебник по фундаментальной общинженерной дисциплине является базой при изучении технических дисциплин, а также при дальнейшей практической работе инженера. Например, учебник по ТОЭ не раз приходится просматривать при изучении электрометрии, электро-материаловедения, теории электромашины, техники высокого напряжения и т. п. для уточнения некоторых положений этих дисциплин, а также при практической работе. Поэтому замена фундаментального учебника по ТОЭ разделенными его кусочками — кадрами, делающими практически невозможным их использование в дальнейшем, также представляется нерациональной.

Отсюда вытекает нецелесообразность замены классического лекционного преподавания во втузах программированным преподаванием. Вместе с тем желательно использовать преимущества программированного обучения: поочередное изучение малых кадров с немедленной проверкой их усвоения, индивидуальность обучения, лучшее запоминание. Поэтому вполне целесообразно применение во втузах программированного изучения; причем при разработке соответствующей методики необходимо учесть особенности и задачи изучаемой дисциплины, а также особенности уча-

щихся. С этой точки зрения «разветвленная программа» — выбор из готовых «чужих» ответов одного правильного представляется порочным из-за отсутствия творческого подхода, возможности из-за несовершенства памяти считать в дальнейшем правильным неправильный ответ и практической невозможности обучения по нему решению задач, например, по ТОЭ — задач по расчету цепей и полей. Для втузов предпочтительнее линейный метод, но, конечно, не простановка пропущенных слов в готовом ответе, а самостоятельное составление ответа в письменной форме с последующим сравнением с правильным ответом, данным в программированном пособии. В зарубежной печати приводятся экспериментальные данные о большей прочности усвоения изучаемого материала с помощью таких конструктивных ответов по сравнению с выборочным методом [1].

Кроме того, учитывая более высокий уровень втуза и его студентов по сравнению со средней школой, целесообразно несколько увеличить размеры кадров до величины одного параграфа учебника, если этот параграф посвящен одному вопросу, например, одному из многочисленных методов расчета электрических цепей.

Автору настоящей книги вместе с соавторами принадлежит учебное пособие по ТОЭ, составленное по указанной выше линейной программе [2]. В нем весь курс ТОЭ разбит на 160 кадров, т. е. каждому из них соответствует один параграф (в среднем 3,5 страницы), принятый в основу учебника ТОЭ [3]. По каждому кадру указаны необходимые для его изучения параграфы этого и других широко распространенных учебников ТОЭ, предлагается самостоятельно в письменной форме ответить на общий вопрос: «Изложите вкратце суть этой темы» и на наиболее важный частный вопрос и сравнить свои ответы с правильными ответами, приведенными в конце книги. Затем по большинству кадров приводится подробное решение типовой задачи с анализом возможных ошибок и предлагается на этой основе решить другие задачи, по которым даны только ответы.

Для примера приведем два кадра из этого пособия по основным разделам курса ТОЭ — теории цепей и теории электромагнитного поля.

По расчету цепей методом контурных токов, изложенным в теории цепей постоянного тока, после изучения соответствующего материала учебника и повторения доказательства предлагается сначала вкратце изложить суть и область его применения. В правильном ответе, приведенном в конце книги, излагается основное: «В методе контурных токов каждому независимому контуру (проще всего элементарному) приписывается контурный ток I_A, I_B, \dots и его направление (проще всего одинаковое, например, по часовой стрелке), контурная э. д. с. $\mathcal{E}_A, \mathcal{E}_B, \dots$, равная, по этому направлению алгебраической сумме э. д. с. источников, входящих в контур, и контурное сопротивление R_A, R_B, \dots , равное сумме его сопротивлений. Тогда для каждого из N независимых контуров составляется по второму закону Кирхгофа уравнение, которое при одинако-

вом направлении обхода, совпадающего с направлением контурных токов, получает вид

$$R_A I_A - R_{AB} I_B - \dots - R_{AN} I_N = \mathcal{E}_A,$$

где R_{AB} — сопротивление общей ветви контуров A и B и т. д. После определения из этой системы уравнений контурных токов находят равные им токи соответствующих внешних ветвей и токи общих ветвей соседних контуров, равные разности их контурных токов. Расчет методом контурных токов по сравнению с расчетом по законам Кирхгофа облегчается благодаря сокращению числа уравнений системы до числа элементарных контуров».

Затем предлагается проработать решенную задачу: определение этим методом токов в ветвях трехконтурной цепи с заданными сопротивлениями в шести ее ветвях, в четырех из которых включены заданные по величине и направлению источники э. д. с. После выбора одинакового направления контурных токов составляется система уравнений для всех трех контуров с последующей подстановкой численных значений э. д. с. и сопротивлений и ее решением методом подстановки или методом определителей. По найденным контурным токам указанным выше способом определяются по величине и знаку действительные токи ветвей. В дальнейшем этот ход решения следует использовать при решении аналогичной задачи символическим методом для цепи синусоидального тока.

Затем в этом кадре предлагается методом контурных токов решить одну из задач, решенных в других кадрах методом эквивалентного источника энергии и методом узловых напряжений.

В кадре, посвященном теореме Умова — Пойнтинга, также предлагается после изучения учебника вкратце изложить суть этой темы. Правильный ответ: «Теорема Умова — Пойнтинга представляет собой закон сохранения энергии в электромагнитном поле:

$$P_{\text{стор}} = P + \frac{\partial W}{\partial t} + \oint \mathbf{P} dS$$

и говорит о том, что мощность сторонних источников $P_{\text{стор}}$, заключенных в рассматриваемом объеме v , затрачивается на джоулевы потери P в проводящей среде, на изменение энергии $\frac{\partial W}{\partial t}$ электромагнитного поля в этом объеме, а часть этой мощности $\oint \mathbf{P} dS$ — мощность излучения — переносится через поверхность S , ограничивающую рассматриваемый объем, и определяется потоком вектора Пойнтинга \mathbf{P} ; эта мощность может быть направлена и внутрь объема».

Затем предлагается для цилиндрического проводника длиной l , диаметром d и сечением s с током I определить мощность потерь и мощность передаваемой энергии, если на поверхности провода равномерно распределен заряд q . Решение этой задачи приведено также в последней части книги: «Мощность потерь оценивается составляющей вектора Пойнтинга, направленной внутрь провода:

$$P_n = E_t H = \frac{I^2}{\gamma \pi s d}, \text{ Вт,}$$

где $E_t = \frac{I}{\gamma s}$ — касательная составляющая напряженности электрического поля;

$H = \frac{I}{\pi d}$ — напряженность магнитного поля.

Мощность, передаваемая вдоль провода, определяется касательной составляющей:

$$P_t = E_n H = \frac{q}{\pi d l \varepsilon} \frac{I}{\pi d}, \text{ Вт,}$$

где $E_n = \frac{q}{\pi d l \varepsilon}$ — нормальная составляющая напряженности электрического поля.

И в заключение этого кадра предлагается вопрос: может ли в теореме Умова — Пойнтинга мощность сторонних источников быть отрицательной, на который в конце книги дается положительный ответ для случая, когда ток и э. д. с. источника имеют разные знаки; тогда мощность потребляется источником, например, при зарядке аккумулятора.

Использование этого пособия в течение нескольких лет в двух ленинградских вузах показало его эффективность, особенно для вечернего и заочного обучений*. Представляется, что составление ответов на указанные вопросы пособия, проработка решенных задач и самостоятельное решение других задач являются наиболее рациональным направлением учебы студента по ТОЭ, обеспечивающим творческое осмысливание теоретических положений и их приложение к практике. Это, в свою очередь, способствует успешному активному проведению практических и лабораторных занятий по ТОЭ, где могут оказаться полезными простые конструкции контрольных машин для проверки результатов решений задач и правильности ответов по сути предстоящих работ в лаборатории.

При вечернем и заочном обучении, т. е. при возможности только кратковременных или редких посещений вуза, вряд ли целесообразно прослушивание отдельных лекций, читаемых обучающей машиной, т. е. без информации о материале, изложенном на предыдущих лекциях. И здесь особенно полезным оказалось использование метода программированного изучения при домашнем изучении материала по учебнику.

Таким образом, при всех видах обучения рекомендуется сочетание классического метода изучения общинженерных дисциплин и линейного программирования их изучения студентами. После прослушивания или изучения очередной лекции по курсу студенты прорабатывают материал, используя программированные пособия, как об этом было сказано выше. Конечно, недобросовестный сту-

* Издание подобного программированного пособия включено в план издания учебников и учебных пособий на 1975 г.

дент может сразу посмотреть правильные ответы по вопросам, но такое «списывание» возможно и при разветвленной программе.

Возможен также метод, когда лектор не излагает на лекциях некоторые разделы курса, например наиболее простые методы расчета цепей, или дает по ним краткие указания, предлагая студентам самостоятельно изучить их дома по учебнику с использованием программированного пособия.

Интересно отметить, что в нашей и зарубежной литературе [1] есть указания о том, что в ряде случаев сочетание методов традиционного и программированного обучения дало хорошие результаты.

1. Задачи и особенности лекций

Лекции — основной метод обучения во вузах; на них отводится около половины учебного времени. Лекции должны играть также организующую роль для всех других видов учебного процесса.

Курс лекции ставит следующие задачи.

1. Изложить важнейший материал программы курса, освещающий основы науки и ее приложения к практике.
2. Познакомить с историей и методологией науки, последними достижениями и проблематикой, осветить спорные вопросы.
3. Развить у студентов потребность к самостоятельной работе над учебником и научной литературой, привить интерес к практическим и лабораторным занятиям по курсу.
4. Связать излагаемый материал с учебником, указав попутно на необходимые изменения и дополнения к нему.

Главной задачей каждой лекции является показ сущности темы, анализ ее основных положений. Лекция должна в определенной научной и логической последовательности охватывать основные принципы и вопросы данного курса. Чем лучше лектор знает предмет, тем глубже и обычно доступнее для студентов он изложит сущность темы, покажет, как ее понимали раньше, как понимают сейчас, каковы возможности дальнейшего развития вопроса. Остальное — внешние признаки, детали, техника расчетов, выводы формул второстепенного значения и всякие подробности — изучается обстоятельнее и прочнее самостоятельно по учебнику. Лектор, повторяющий содержание учебника, превращается в диктора. Он нерационально растрчивает время и подрывает свой авторитет в глазах студентов.

Чтобы помочь самостоятельной работе студентов, лектор должен показать весь объем темы, ее основные разделы. Этим перед студентами открывается конечная цель работы по данной теме, работа становится более целеустремленной, сознательной и интересной. Они усваивают канву дальнейшей работы, получают установку. В начале курса этой задаче посвящается специальная вводная лекция, носящая обзорный характер. Кроме того, начальная часть лекции или цикла лекций должна быть также обзорной. С той же целью полезно в ходе лекции указывать начало каждого раздела, суть и задачи его, а закончив изложение, подводить итог по этому

разделу, чтобы связать его со следующим. Подведение итогов по прочитанному разделу помогает сознательному усвоению темы, так как показывает ретроспективно сущность темы, дает все общие положения ее в комплексе, отвлекаясь от деталей. Эти общие положения, как бы сжато они не были изложены, должны выявить внутренние связи отдельных элементов темы, ввести их в определенную систему.

Эффективность лекций в учебном процессе обеспечивается рядом положительных ее качеств. Сюда относятся:

1. Доходчивость, благодаря живой устной речи, которая при умелом пользовании интонацией, паузами, логическими ударениями, а также мимикой и жестами позволяет отчетливо выделить основное, существенное и, кроме того, воздействует на аудиторию эмоционально, заставляя «чувствовать» лекцию.

2. Возможность иллюстрировать лекции записями, схемами и чертежами, выполняемыми на доске, а также плакатами, макетами и демонстрациями опытов.

3. Воспитательная роль лекции благодаря возможности непосредственного воздействия на аудиторию.

4. Гибкость лекции — возможность варьировать ее содержание в зависимости от уровня слушателей или других обстоятельств.

5. Возможность непрерывно давать сведения о новейших достижениях науки.

6. Большой, чем при других видах учебных занятий, охват студентов одним преподавателем и большой объем материала, прорабатываемого в течение короткого времени.

Одновременно, однако, надо отметить и ряд недостатков лекционного метода:

1. Лекция, читаемая без иллюстраций, воспринимается только на слух. Мысль или образ, выраженные только словами, усваиваются труднее образов, воспринятых с помощью зрительной и двигательной памяти, и требуют более напряженной работы мозга, а также обычно ряда повторений. На лекции слова как бы протекают в сознании быстрой волной, а возможность повторений их невелика. Поэтому содержание лекции часто усваивается неполно и непрочо.

2. Задача организации внимания на лекции очень сложна из-за трудности определить в ходе лекции степень внимательности слушателей. У лектора нет возможности, как у руководителей практическими занятиями, коллоквиумами и т. п., следить непрерывно за качеством усвоения, за активностью восприятия, за состоянием внимания. Иногда ему трудно уловить, что именно непонятно аудитории, что требуется повторить или разъяснить, а возможность заставить слушателей высказаться весьма ограничена. Еще больше усилий требуется для того, чтобы привлечь их внимание и поддерживать его в течение всего занятия на необходимом уровне.

3. В ходе лекции трудно организовать активную работу учащихся, поддерживать их активное мышление, стремление к лучшему пониманию и усвоению материала.

4. Лектору трудно приспособить изложение к возможностям каждого слушателя. Аудитория всегда разнородна и по подготовленности и по способностям, а недостаток времени не позволяет повторять то, что может оказаться непонятным.

Все эти трудности, однако, в определенной степени преодолимы, и каждому лектору предъявляется требование максимально использовать положительные качества лекции и свести к минимуму ее отрицательные свойства.

2. Лекции и учебник

Роль учебников очень велика и их нельзя заменить слушанием лекций и последующим изучением своего конспекта, т. е. записи материала, который учащийся слышит впервые, а поэтому часто неточной, не отражающей полностью систематический ход и сущность мыслей лектора.

Не обладая некоторыми несомненными преимуществами лекции, главным образом, приспособляемостью к аудитории, воздействием живого слова на слушателей и т. д., учебник отличается достоинствами, восполняющими недостатки лекционной системы. Работа с ним отличается большой активностью, внимание более сосредоточено. А если оно ослабевает, то всегда имеется возможность вернуться к пройденному. Если учащийся при чтении книги не усваивает сразу того или иного вопроса, он может разобрать его повторно, по разделам, с карандашом в руке. Забытое легко восстановить в памяти, перевернув несколько страниц книги. Кроме того, работа над несколькими источниками (учебник, запись лекции и другие пособия) закладывает основы научного мышления и исследования, приучает к научной работе.

Из изложенного ясна правильность рекомендации Научно-методического совета Минвуза СССР: «Лекция должна вести студентов к книге, должна вызывать интерес к углубленной самостоятельной работе, должна направлять студентов на знакомство не только с учебной, но и с монографической и с журнальной литературой по данному предмету».

Многие студенты пренебрегают работой над книгой, заменяя учебники своими конспектами, что является для них большим злом. Автор учебника, специалист в своей области, имеет значительно больше возможностей и времени, чем студент, для того чтобы продумать каждую мысль и отточить каждую формулировку. Кроме того, учебник включает описание многих подробностей, признаков предметов и явлений, необходимых учащемуся, но не упоминаемых на лекциях. Поэтому даже «лучший конспект лучшего студента» не может соперничать с учебником, а тем более заменить его. Ограничиваясь своими конспектами, студенты стремятся облегчить свой труд и экономить время. В известной мере повинны в этом и лекторы. Отходя чрезмерно от принятых учебников, резко изменяя последовательность изложения, пренебрегая

формулами и выводами учебника и признавая правильными только свой метод расчетов, такие преподаватели отталкивают слушателей от учебников. Любому лектору предоставляется возможность написать свой учебник, лучший существующего, но пока книга не издана, преподаватель обязан считаться с учебными пособиями, которыми пользуются студенты.

На лекциях необходимо не только пропагандировать принятый учебник, но и требовать работы над ним, добиваясь заинтересованности учащихся в широком использовании как его, так и других учебных пособий. Читать лекции следует так, чтобы без книги, как дополнения к лекции, нельзя было обойтись, чтобы ни один зачет и экзамен нельзя было сдать только по лекциям. С учетом этого и следует производить отбор материала. Все, что безболезненно можно переложить на книгу и практику, следует перекладывать на них. Вывод формул далеко не всегда обязателен для лектора, если эти выводы имеются в учебнике или пособиях. Иногда лучше сослаться на учебник и разъяснить сложные положения последнего на консультации.

Отбор материала для домашней работы студентов надо производить осторожно, чтобы не нарушить цельность курса. Все основные вопросы должны быть полностью охвачены лекциями. В этом случае студенты, которые не отработали части материала дома, все же не теряют основной линии курса.

Прослушав лекцию и записав основные положения ее, студент получает представление об объеме темы, ее разделах, о содержании и сущности узловых вопросов и положений и о плане прохождения темы. Пользуясь этим материалом, как основой, он приступает к работе над учебным пособием, дополняя и углубляя сведения, полученные им на лекции, сведениями из учебника.

3. Содержание лекций

Содержание лекций определяется прежде всего программами курсов, утвержденными Минвузом СССР. Лекции должны охватывать все темы, но не все вопросы программы. Часть материала должна изучаться на практических и лабораторных занятиях и в процессе самостоятельной работы студентов над учебниками.

Программы определяют содержание курса и дают основной вариант последовательности изложения. Содержание курса является обязательным, но последовательность изложения может варьироваться по решению кафедры. Эти отклонения должны быть обоснованы определенными научными или педагогическими соображениями, особенностями прохождения курса или специфическими условиями учебной обстановки. Кроме того, они не должны нарушать согласованности лекционной части курса с другими его занятиями, а также с одновременно изучаемыми другими дисциплинами, использующими материал читаемого курса.

Каждая лекция является научным трудом, но трудом специфическим, резко отличным по его целевой установке от обычного научного исследования, монографии, диссертации или реферата. Эти последние направлены на решение определенной научной задачи и предназначаются для доклада аудитории с тем же уровнем развития, что и у автора, а иногда (защита диссертации) — более высоким, чем у него. Совсем другое дело — лекция учебного характера. Она не решает новых задач, а излагает уже готовые решения тех или иных проблем. Она предназначена для студентов, у которых и знаний меньше, чем у преподавателей, и научно-техническое мышление развито недостаточно. Содержание каждой лекции должно иметь строгую направленность и должно учитывать уровень аудитории. Применяясь к этому уровню, лектор вынужден иногда прибегать к некоторой популяризации. Но это обстоятельство не должно ни в коем случае нарушать строгой принципиальности и точности содержания лекции, снижать ее научный уровень. Популяризация никогда не должна превращаться в вульгаризацию, в которую иногда впадает неопытный лектор.

Крайне желательно, чтобы каждая лекция охватывала и исчерпывала определенную тему курса. Лекция должна, как правило, представлять собой логически вполне законченную работу. Лучше сократить тему, но не допускать перерыва ее на таком месте, когда основная идея еще полностью не раскрыта.

С большой строгостью должен выдерживаться принцип постоянной связи теории и практики. В лекциях по ТОЭ надо приводить примеры применения теории для решения практических задач электротехники. Например, излагая вопрос о мощностях цепи переменного тока, надо подчеркнуть, что все устройства должны быть рассчитаны на полную мощность, тогда как средняя — полезная — мощность равна произведению полной мощности на коэффициент мощности, откуда вытекает необходимость повышения последнего. На лекциях должны также разбираться методы решения типовых задач, по возможности взятых из электротехнической практики или связанных с ней. Такой подход воспитывает студентов, так как учит их всегда связывать вопросы теории и практики, а кроме того, делает лекцию более интересной и доходчивой.

Необходимо выделить положения, которые даются в виде постулатов. Все остальное должно быть на их основе выведено и доказано. Так, уравнения Максвелла нельзя вывести одно из другого, но из этих уравнений можно вывести ряд законов и зависимостей; некоторые из них можно постулировать вместо уравнений Максвелла, а последние вывести из этих постулатов.

Иногда, учитывая уровень подготовки студентов, приходится давать ряд вопросов без выводов (например, формулу напряженности внутри соленоида и т. п.). Но подобный метод надо рассматривать как неизбежное зло — излишнего постулирования надо избегать. Если нельзя дать полного доказательства того или иного положения из-за недостатка времени, то желательно привести соображения, хотя бы косвенно подтверждающие его правильность.

Иногда в тех же целях приходится несколько упрощать ход умозаключений. Однако не следует и недооценивать возможностей своих слушателей. Благодаря изучению обширных курсов математики, физики и теоретической механики студенты младших курсов вполне подготовлены к пониманию общеинженерных дисциплин, некоторые же лекторы часто пренебрегают богатыми возможностями вести преподавание на более высоком уровне.

4. Подготовка лекций

Требовательный к себе преподаватель не выйдет ни на одно занятие, ни на одну лекцию без тщательной подготовки. Даже читая курс, который в течение трех-четырёх лет повторяется примерно в одном варианте, он должен в зависимости от состава аудитории и других особенностей обстановки вводить некоторые коррективы методического или программного характера, периодически «освежать» содержание и пополнять его новыми научными данными.

Прежде чем начать подготовку отдельных лекций, совершенно необходимо продумать в общих чертах порядок изложения всего курса и детально семестрового, выбрав по учебникам и книгам один из многочисленных вариантов или предложив свой вариант, который кажется кафедре и лектору оптимальным; при этом свой вариант, учитывая сказанное в п. 2, должен дать студентам возможность домашней проработки материала лекции по рекомендованному учебнику. Если готовить только отдельные лекции, обязательно возникнут неувязки. Таким образом, приступая к подготовке отдельной лекции, лектор должен уже иметь ее канву и ему остается только детальная разработка, для которой, помимо основных учебников и руководств, следует привлекать журнальные статьи, монографическую литературу, свои собственные идеи научно-методического характера и свой производственный опыт. Когда материал к лекции подобран, возникает вопрос, как готовить ее: в виде полностью написанного текста или ее плана. Вопрос этот решается однозначно: лекцию можно и нужно читать только по плану. Требование это объясняется следующим.

Устная речь существенно отличается от письменной, будучи менее связанной. Она несколько сокращена и сжата, но более выразительна и доходчива. У лектора всегда есть возможность на ходу дополнить, разъяснить или упростить выражение своей мысли. Письменная речь более стройна и обработана, но она «отлита» в раз навсегда составленную форму. Для того чтобы она была хорошо понята и прочно усвоена, иногда необходимо повторное и даже многократное чтение одной и той же мысли. Такое повторение легко возможно при работе над учебником и практически невозможно на лекции при чтении ее по полному тексту. Читая лекцию по тексту, лектор превращается в диктора, особенно в тех случаях, когда читается лекция, составленная другим. При этом все преимущества

живого слова пропадают, теряется контакт с аудиторией и возможности регулировать внимание, активизировать слушателей и перестраивать лекцию, если в этом возникает необходимость.

Таким образом, лекцию нельзя читать по письменному тексту, но для того, чтобы изложение было плановым и охватывало все вопросы темы, лектор, как сказано выше, должен составлять план каждой лекции курса. Этот план должен содержать все формулировки, выводы формул и необходимые материалы для справок. В нем должна быть указана последовательность изложения, отмечены основные положения и выводы, которые должны быть записаны слушателями, ссылки на учебник, указания необходимой литературы для студентов и задания для самостоятельной работы. Там же надо записать, когда и какие наглядные пособия и демонстрации показываются на лекции, а также примерный расчет времени на изложение отдельных разделов. В плане должна найти отражение и методика изложения, в частности, выделение трудных мест, способ объяснения их, контрольные вопросы к аудитории. Необходимо внести в план лекции краткое повторение пройденного для создания «смысловых опор». Повторять надо только то, на чем будет строиться материал текущей лекции. При составлении плана следует пользоваться условными обозначениями, тем или иным подчеркиванием, рамочкой и т. д. Просматривая написанный план, надо тщательно проверить порядок изложения: нет ли в нем логических ошибок, нарушений дидактических принципов. Одновременно следует еще раз отметить узловые и трудные места, что именно надо продиктовать студентам, на что обратить особое внимание. Все это делается и в ходе составления плана, но ошибки видны отчетливее при его дополнительном просмотре. Во всех случаях наличие хорошего плана облегчает чтение лекции. Но это не значит, что, подготовившись к лекции, можно читать ее, не учитывая отношения аудитории к лекции и особенностей ее восприятия.

5. Проведение лекций

Лекция, как и всякое учебное занятие, предъявляет определенные требования и к лектору и к его слушателям. Основное в лекции — это ее содержательность, логичность, последовательность и другие указанные выше свойства, обеспечивающие доступность лекции для слушателей и возбуждающие их интерес к материалу. Вместе с тем весьма существенно и качество речи. Лекция проводится в виде устной монологической речи с некоторыми чертами письменной речи, что связано с точностью формулировок, выводов и т. д. Немалую роль играют в ней приемы, делающие речь «живой». Это прежде всего правильная дикция, умение пользоваться интонацией, паузами, логическими и эмоциональными ударениями, выразительными словами, оборотами и образными выражениями. Не следует говорить монотонно, что тормозит внимание, усыпляет. Необходимо варьировать и тон речи, и темп ее, более важные мес-

та излагать медленнее и оттенять их более громким голосом, менее важные можно проходить скорее и более тихим голосом. Большую роль играют соответствующие жесты и мимика, а также эмоциональность изложения, позволяющие не только слушать лекцию, но и «чувствовать» ее.

Учитывая трудность запоминания слуховых восприятий, следует принимать дополнительные меры, а именно, выдерживать умеренный темп изложения, повторять узловые и особо трудные места лекции, иногда подчеркивая словами: «это важно», «внимание», пережевывать трудные и легкие вопросы и т. п.

Есть люди, владеющие искусством и умением говорить красиво, доходчиво и выразительно. Но и не обладая подобным талантом, можно развить в себе хороший стиль изложения и хорошую дикцию. Для этого полезно упражняться в громком чтении в семье или в обществе товарищей, причем для чтения следует выбирать лучшие произведения классиков нашей литературы. Очень важно отучить себя от употребления паразитических словечек «значит», «вот», от ненужных криканий и звуков вроде «гм», «э-э» и т. п. Очень полезно записать два-три своих выступления на пленку магнитофона и затем несколько раз внимательно прослушать эти записи, заметить недочеты своей речи и начать систематически исправлять их.

Лектор должен учитывать число своих слушателей и устройство аудитории. Если аудитория плохо оборудована и сидящим сзади плохо слышно и видно, следует чаще выходить на середину аудитории, использовать на доске хорошо видимую часть и писать большими буквами, показывать плакаты только крупного масштаба; силу голоса также надо соразмерять с размерами аудитории.

Для преодоления двух наиболее отрицательных свойств лекционного метода — слабой активности слушателей и недостаточной устойчивости их внимания — следует научиться хотя бы в некоторой степени контролировать в ходе лекции состояние внимания аудитории и ее активности, наблюдая за лицами и руками студентов. Что же касается мер для повышения активности и внимания аудитории, то основное — сделать студентов полноценными участниками учебного процесса, добиться, чтобы они глубоко поняли, какое значение имеет для них читаемый курс и, в частности, данная лекция. Очень важно, с этой стороны, как говорилось выше, поставить перед ними ряд задач для усвоения (по разделам, по подтемам), подводить частные итоги и указывать цель дальнейшей работы.

Удачным методом повышения активности является метод контрольных вопросов. Часто лектор задает вопрос аудитории и, помедлив, отвечает на него сам. Даже в таком виде постановка вопроса играет активизирующую роль, заставляя слушателей подтянуться и начать активно мыслить, чтобы найти правильный ответ. Вместе с тем неудачным надо считать довольно частый прием, когда преподаватель ставит вопрос очень неопределенно: «Отсюда следует,

что...» и делает паузу, ожидая ответа. Такая постановка вопроса только дезориентирует слушателей. Следует задавать студентам четкий вопрос с тем, чтобы тут же получить и оценить их ответ.

Целесообразно предоставить студентам право задавать вопросы преподавателю в ходе лекции. Опасения, что такие обращения студентов нарушают ход мыслей лектора и ведут к нарушению дисциплины занятия, преувеличены. Об этом говорит длительный опыт применения этого метода, всегда оживлявшего лекцию и сближавшего лектора с аудиторией. Нельзя, конечно, допускать, чтобы лекция превращалась в «вечер вопросов и ответов»; студентов, которые хотя бы задерживать вопросами ход лекции, можно легко поставить на место. Если вопросов много, лектор обещает ответить на них во время перерыва или на консультации. Обычно же соблюдается такой порядок. Студент, желающий задать вопрос, поднимает руку. Преподаватель делает ему знак и, закончив мысль или раздел, предлагает задать вопрос и отвечает на него. Если преподаватель предпочитает отвечать на вопросы в конце лекции, надо рекомендовать студентам записать свои вопросы во время лекции. Таким образом, сохраняется контакт с аудиторией и повышается ее активность.

Некоторую помощь в этом может оказать студенческий актив, воздействуя на своих нерадивых товарищей, и делясь с преподавателем своими выводами о достоинствах и недостатках лекции, о том, что слабо доходит до сознания студентов или осталось непонятым.

Внимание аудитории должно быть организовано в самом начале лекции. Указание лектора о теме и содержании лекции, о задачах ее и повторение некоторых вопросов, известных слушателям и связанных с темой, вполне достаточный базис для первоначального возбуждения произвольного внимания.

Поддержание внимания студентов на необходимом уровне в течение всей лекции зависит от внутренних качеств лекции и характера проведения ее. Но как бы содержательна и интересна не была лекция, как бы искусно не было ее изложение — падение внимания неизбежно, так как напряжение внимания есть труд и притом довольно интенсивный. Вглядываясь в лица слушателей и замечая признаки утомления, необходимо дать аудитории отдых, внести разрядку в их состояние. Для этого надо изменить направление и тонус психической активности, перейти на другой, более легкий вопрос, или, что еще лучше, на вопрос, имеющий более отдаленную связь с темой лекции, рассказать какой-нибудь случай из инженерной практики, из области расчетов, исследований, испытаний. После небольшой передышки можно вернуться к теме, начав с легкого: с напоминания выводов, сделанных ранее, подвести внимание аудитории к тому месту, на котором был сделан перерыв, и развивать тему дальше. Не всегда и не каждому удастся добиться подобными методами непрерывного внимания в течение всей лекции, но применение их всегда дает эффект, а кроме того, вырабатывает у лектора навыки организации внимания.

Как уже указывалось, и научные соображения, и опыт категорически запрещают читать лекции по тексту, но рекомендуют пользоваться ее планом. В связи с этим надо указать на опасность импровизации. Ни в коем случае нельзя «на ходу» вносить изменения в план и в порядок расчетов и выводов, какие бы новые мысли не возникли у лектора — концы могут не сойтись с концами. Новую идею следует в перерыве записать и позже в спокойной обстановке обдумать. Хорошая подготовка всегда лучше скороспелого эксперимента.

При чтении лекции можно открыто пользоваться своим планом. Когда лектор читает лекцию по написанному тексту, не отрывая глаз от бумаги, это производит удручающее впечатление на аудиторию. Но когда тот же лектор заглядывает время от времени в свой план, студенты реагируют на это положительно, чувствуя, что преподаватель поработал над лекцией.

Понимая необходимость всех указанных требований к чтению лекций и строго выполняя их, лектор быстро устанавливает контакт с аудиторией. Улавливая в ходе лекции ряд признаков, он быстро реагирует на них и добивается того, что студенты очень чутко воспринимают его речь. Его слова и мысли как бы получают осязаемую отдачу со стороны аудитории. И если слушатели перестают понимать лектора, то у него появляется чувство, будто бы он говорит в «безвоздушное пространство». Это заставляет его немедленно вернуться к уже прочитанному и изложить его заново, часто в ином, более легком аспекте. Наличие такого контакта, достигаемого при работе над собой и известном опыте, — залог успешного проведения лекции.

6. Иллюстрация лекций

Способы иллюстрации лекций можно свести в несколько групп:

1. Доска и работа на ней.
2. Готовые графические наглядные пособия в виде плакатов с чертежами, схемами, изображениями приборов, сделанными по заказу художником или типографским способом. Сюда же относятся и фотографии, демонстрируемые с помощью эпидиаскопа, и кинофильмы.
3. Объемные пособия: модели и макеты.
4. Демонстрация опытов.

Использование доски, графических и объемных пособий, а также демонстрация опытов увеличивают наглядность лекции, повышают внимание и активность слушателей. Эти приемы привлекают к усвоению материала, кроме слуховой, зрительную и двигательную память. Нарисованное на доске или на плакате остается перед глазами студентов более или менее длительное время. Многократно всматриваясь в чертеж или формулу, студент несколько раз

повторно воспринимает их и этим создает себе прочное представление и основательное запоминание.

Показывая сначала принципиальную основу конструкции или явления в упрощенном виде («принципиальная схема»), затем на той же доске или на следующих схемах развитие основной идеи, лектор ведет слушателей от простого к сложному.

Работа на доске — самый активный метод иллюстрации лекции. Следя за ходом выводов лектора, наблюдая за тем, как из-под его руки вырастает график (сначала оси координат, затем первая, вторая, третья кривые), воспринимая взаимосвязь величин, студенты становятся как бы участниками этой работы, повторяя ее в своих тетрадах и следуя за преподавателем по пути его мышления.

В этих условиях к лектору предъявляются строгие требования организованности и четкости в работе. Он не должен забывать, что за работой его рук следят десятки глаз и сознание десятков его учеников работает в унисон с его сознанием. Поэтому писать на доске надо четко, большими буквами, чтобы их было видно на последних рядах аудитории. Порядок записей должен строго совпадать с логическим порядком расчетов. Недопустимо записывать формулы вразброд, как попало. Опытный лектор ведет запись на доске всегда в определенном порядке, выделяя важные формулы рамкой. Стирает он с доски осторожно, оставляя то, что может еще пригодиться. Формулу выгоднее оставлять на доске в течение 10—15 минут, чем стирать, а потом восстанавливать; этим дается возможность учащимся прочнее ее запомнить. Чтобы приучить студентов к четкой и точной записи, надо быть самому примерным в этой области, вплоть до мелочей: применять только стандартные обозначения, строго различая заглавную букву от строчной и т. д.

Рекомендуется применять цветные мелки, что резко повышает наглядность чертежей и схем. При этом надо взять за правило чертить каждый элемент графика всегда одним и тем же цветом. У студента, следящего за работой преподавателя, создаются новые ассоциативные связи. Так, кривую напряжения он всегда представляет себе зеленой, кривую тока — красной, мощности — желтой и т. п., стандартные обозначения он прочно связывает с их значением. Все это резко облегчает понимание, помогает легче «схватить» мысль лектора. Если же допускать здесь путаницу, то она будет ломать установленные в сознании связи и очень сильно затруднит усвоение.

Из изложенного видно, насколько важно иметь в аудитории хотя бы одну достаточно большую доску в хорошем состоянии и хороший мел. Но весьма желательны две доски, из которых по крайней мере одна может вращаться.

Графические пособия должны быть сделаны тщательно, с учетом особенностей восприятия слушателей и с соблюдением дидактических принципов.

Схемы должны позволить выделить и понять основное, главное. Одни из них показывают принцип (конструкции, процесса) в са-

мом простом виде, последующие усложняют его, но при этом также показывают сущность развития, его пути и причины. Нельзя чертить схему или изображение какой-либо конструкции вообще, без определенного замысла, без учебной цели. Например, на одном плакате показан индукционный ваттметр. Плакат, казалось бы, выполнен хорошо, все до скрупулезности точно вычерчено и раскрашено. Но так как все внимание было обращено на оформление, а цель плаката художник не понимал, то для него все в рисунке одинаково важно. И поэтому главное, важное для учащихся, на плакате не выявлено, не подчеркнуто. На другом плакате показан тот же прибор. Но здесь дана только его сущность: ось, стрелка, диск, катушки напряжения и тока, противодействующая пружина, успокоитель. Все эти детали показаны разным цветом. Все несущественное для понимания удалено и не мешает уяснению основного принципа устройства. Такой плакат значительно действеннее первого.

На лекции полезно применять дневные диапроекторы и эпидиаскопы, а также показывать учебные кинофильмы. Все фильмы должны быть просмотрены предварительно, и на лекциях следует демонстрировать только те их фрагменты, которые непосредственно относятся к рассматриваемому вопросу. При показе кинофильмов необходимо учитывать отрицательные стороны затемнения аудитории: затрудняются контроль за студентами и возможность записи. Если отсутствуют специально оборудованные затемненные аудитории с настольными лампами, освещающими только рабочие места слушателей, более целесообразно показывать кинофильмы на занятиях, специально посвященных демонстрациям.

Объемные модели и макеты следует выполнять с тех же позиций наглядности и простоты, как и плакаты. Весьма полезны, например, большие действующие электроизмерительные приборы различных систем. Хороши также разборные и разрезные модели.

Лекционные демонстрации. Читая лекции с показом опытов исключительно полезно. Изложив трудный вопрос, лектор переключает внимание слушателей на показ опыта. Тем самым он переводит их от слуховых к зрительным восприятиям и конкретизирует теоретические положения.

Демонстрации опытов должны быть тщательно подготовлены, проходить гладко и занимать минимум времени. Внимание студентов должно быть направлено на самое главное. В Московском энергетическом институте на кафедре теоретических основ электротехники столы для демонстрации опытов с роликами на ножках подготавливаются в препараторской, где на них устанавливается необходимое оборудование. К началу демонстрации стол вкатывается в аудиторию, включается и происходит демонстрация. Затем стол убирается, а когда нужно, вкатывается другой. В числе приборов имеются осциллограф, дающий большую кривую на экране, и гальванометры, простой и баллистический, которые дают

на экране заметный «зайчик». Эту практику полезно применить и в других вузах.

Наша промышленность выпускает некоторое демонстрационное оборудование: магнитоэлектрические осциллографы, гальванометры и др. Для демонстраций можно приспособить также и обычные щитовые приборы, удлинив их стрелки и усилив противовесы и магнитно-индукционные успокоители. Эта работа может быть выполнена в мастерской и лаборатории кафедры.

Большую пользу и студентам, и лектору может оказать раздача на лекции размноженных в достаточном количестве материалов к лекции; они могут содержать формулы к текущей теме (например, различные формулы для фильтров и четырехполюсников, о которых рассказывается на лекции), диаграммы и т. п. Их наличие освобождает студентов от торопливого переписывания с доски и от построения сложных графиков. На таких страничках могут содержаться материалы, дополняющие учебник, и поставлены новые вопросы. При этом желательно, чтобы вуз обеспечивал быстрое (за день, за два) копирование на одном из современных аппаратов листочков, подготовленных лектором в форме вспомогательных записок.

Резюмируя изложенное, можно сказать, что умело подготовленная лекция, прочитанная хорошим языком, тщательно иллюстрированная, является могучим средством обучения. Однако ограничиться только лекциями нельзя: нужно применять и другие виды учебных занятий.

**1. Цель и методы проведения
практических занятий**

Принцип постоянной связи теории и практики, обязательный для обучения во втузе, получает непосредственное осуществление на практических и лабораторных занятиях. На практических занятиях решаются задачи, конкретизирующие теоретические положения, изложенные на лекциях и в учебниках. Кроме того, эти занятия обеспечивают активное повторение полученных знаний. Целью практических занятий является:

1. Показать студентам методы приложения теории к решению задач и научить их решать типовые задачи.

2. Проверять уровень понимания студентами вопросов, пройденных на лекции и по учебнику, степень и качество усвоения. Выяснить, как каждый студент работает над собой.

3. Восполнить пробелы в пройденной теоретической части курса и помочь его усвоению.

4. Привить расчетные навыки, необходимые для работы на производстве и в научной работе.

Практические занятия требуют тесной связи их с лекциями как по теме, так и по времени их проведения. Если на лекции читается грехфазный ток, а задачи решаются на простые цепи, то преподавателю не удастся приучить учащихся работать систематически. Студенты почувствуют, что могут отстать от лекций, так как то, что они слушают сегодня, отразится в упражнениях только через месяц. В соответствии с этим преподаватель и должен планировать свои занятия. Если все же полного соответствия между темой лекции и практического занятия не получается, следует по возможности связать старую тему с новой, например, решать задачи на простые цепи для трехфазной схемы с независимой работой фаз.

Преподавателю, ведущему практические занятия, нужно следить за ходом лекций и держать постоянную связь с лектором, а также учитывать текущую и будущую производственную деятельность студентов, связывая с ней предлагаемые им задачи.

Обычно практические занятия заключаются в групповом решении задач в аудитории. Этот испытанный и широко применяемый метод освещается ниже. Из других методов заслуживает внимания метод объединения практических и лабораторных занятий, если их

темы близки, осуществляемый в лаборатории электрических цепей Одесского электротехнического института связи по разделу цепей постоянного тока. Студенты рассчитывают заданную цепь, затем собирают ее схему с амперметрами и вольтметрами, используя заданные источники и с помощью омметра подбирая необходимые сопротивления. Результаты измерения сравнивают с расчетом, причем применение приборов магнитоэлектрической системы позволит проверить правильность полученных в расчете направлений иско- мых токов и напряжений. Аналогично проводятся некоторые рабо- ты по цепям переменного тока, но здесь для проверки правильно- сти предварительно рассчитанной векторной диаграммы целесооб- разно включить в схему фазометры. Применяется и другая после- довательность расчетов и экспериментов. Например, из опытов хо- тырехполюсника, рассчитывается, собирается и включается эквива- лентная П- или Т-схема и проверяется ее эквивалентность.

Другой, менее активный, но весьма наглядный метод заключа- ется в проведении демонстраций, связанных с темой практических занятий. Они проводятся в комнате, рассчитанной на одну группу. Такое помещение легче оборудовать, чем большую аудиторию, де- монстрации в ней хорошо обозримы всеми студентами, последних можно привлечь к участию в опытах. В этих условиях полезно про- водить эксперименты для подтверждения правильности решения задач и для решения спорных вопросов.

2. Содержание практических занятий и подготовка к ним

Занятия, проводимые обычным методом, следует начинать с короткого теоретического семинара по теме занятия. Вопросы, контролирующие знание и понимание теории, нужно предвари- тельно подобрать и систематизировать, расположив в логическом по- рядке, чтобы в результате ответов на них у всех присутствующих создалась цельная теоретическая основа — костяк предстоящего занятия.

Столь же тщательно должен быть подобран материал для ре- шения задач. Нельзя допускать, чтобы преподаватель, ткнув паль- цем в задачник, предлагал студентам случайные задачи. Их нуж- но подбирать или составлять так, чтобы охватить все важные воп- росы темы. Задачи не должны содержать повторов, а арифмети- ческие выкладки должны быть краткими. Задачи должны обладать «оптимальной трудностью», быть понятны и доступны студентам. Крайне желательно, чтобы задачи были взяты из электротехниче- ской практики, а не были бы безжизненными упражнениями. Од- нако не следует впадать и в другую крайность — давать задачи из областей, пока неизвестных учащимся, и применять незнакомую им терминологию. Учитывая, что теоретические основы электротехники изучаются на младших курсах до специальных дисциплин, когда производственные познания большинства студентов могут ока-

заться недостаточными, приходится выбирать «средний» вариант: решая, например, задачи на расчет цепей, следует указывать области их применения: это схема электрического термометра, магнитная цепь электромагнита, схема настройки радиоприемника и т. п. Каждая задача, предложенная студентам, должна быть заранее решена и методически обработана преподавателем. Метод решения отдельных задач может быть синтетическим, когда план решения совпадает с ходом его, или аналитическим, когда этот план вырабатывается путем обратных рассуждений, исходя из результата.

Для подготовки к занятиям можно использовать примеры решения задач в учебниках по ТОЭ [9—14], сборники, в которых разработаны типовые задачи, даны их подробные решения, показаны возможные ошибки и возможные варианты решений, и задачки, предназначенные для студентов, в которых приведены решения основополагающих задач, например [4, 5, 6].

Под редакцией и с участием автора настоящей книги было выпущено пособие для преподавателей [7], состоящее из ряда решенных задач. Задачи выбраны, исходя из принципиально необходимого минимума. Для каждой задачи указана ее учебная цель, даны указания по решению, приведено само решение, его варианты, возможные ошибки и важнейшие выводы из него. Опыт работы с этим пособием оказался весьма положительным.

Возражения против такого рода пособий, основанные на том, что в них все «очень разжевывается», что преподаватель не занимается самостоятельной работой, нельзя считать основательными. В распоряжении лекторов имеются прекрасные пособия (учебники, монографии и т. п.), тем более нуждаются в пособиях менее опытные преподаватели, ведущие практические занятия. Наличие пособий не исключает для них возможности творческой работы, рационализации предложенных задач и методов их решения.

Выбирая или составляя задачи и решения к ним, необходимо учитывать возможность того, что учащийся пойдет не по пути, предусмотренному преподавателем. Поэтому приходится подготавливать несколько вариантов решения, продумать, на что следует обратить внимание учащихся, что нужно подчеркнуть особо. По окончании решения задачи нельзя ограничиться словами: «Задача решена, переходим к следующей». Преподаватель обязан сделать выводы из решенной задачи, обобщить их, указать, где подобные задачи могут встретиться на практике и т. п. А для этого он должен основательно подготовить свое итоговое выступление.

Другая цель стоит перед преподавателями при подготовке задач к контрольной работе. Эти задачи надо выбирать так, чтобы решение могло выявить знания студентов по всему разделу курса. Особую роль играет четкая формулировка задач, не допускающая кривотолков, а также такая степень трудности, которая позволила бы среднему студенту решить ее в отведенное время.

Умелое проведение практических занятий — сложное дело, и готовиться к ним надо очень серьезно.

3. Проведение практических занятий

Как указывалось выше, занятие начинается с опроса студентов для повторения материала, который необходим для предстоящего решения задач. Опрос преследует и другие цели: проверку знаний и подготовленности к занятиям студентов, а также создание «смысловых опор» для предстоящей работы. Следует опросить возможно больше учащихся. Отвечать они могут устно, по формулы, особенно основные, должны быть написаны ими на доске. Некоторые преподаватели предпочитают вместо опроса изложить теоретическую часть самому. Это, конечно, легче, но методически менее ценно. Повторение в виде самостоятельных ответов студентов значительно эффективнее пассивного прослушивания дополнительной лекции на ту же тему.

Иногда преподаватель сам решает на доске типовую задачу и лишь после этого задает подобную задачу студентам. Этот пассивный метод также следует считать порочным. Гораздо целесообразней, чтобы все учащиеся, направляемые преподавателем, сами как бы разрабатывали методику решения типовых задач. Есть некоторые задачи, имеющие принципиальный характер, например, задача на расчет цепи методом уравнений Кирхгофа, задача на символический метод и т. п. Решение таких задач целесообразно изложить на лекциях, притом не обязательно до конца. Превращать же практические занятия в лекцию не следует.

Переходя к решению задач, преподаватель, не вызывая никого к доске, записывает на ней условие задачи. Это заставляет всю группу настроиться, напрячь внимание и активно начать думать в задание. Если задача будет дана позже, когда у доски уже стоит вызванный, активность группы, естественно, понижается.

Решение задач можно вести двумя методами. Первый из них — это решение задачи одним вызванным к доске студентом. Метод этот имеет то преимущество, что преподаватель может руководить отвечающим и своевременно выправить отклонение хода решения от верного пути. Недостаток этого метода заключается в пассивности остальных учащихся, особенно если они оставлены без надзора. Многие сами задачи не решают, ожидая пока она будет решена на доске и можно переписать решение в тетрадь. Поэтому, наблюдая за работой студента, вызванного к доске, необходимо обходить остальных и контролировать их, добиваясь, чтобы все решали задачу самостоятельно. При другом методе задача решается всеми на местах в тетрадях. И в этом случае преподавателю также придется обходить студентов, давать указания, помогать советом и воздействовать на нерадивых. Если решение задачи вызывает затруднения и сопровождается ошибками, к доске вызывается один из учащихся и излагает свое решение. Это решение сравнивается с решением других и подвергается обсуждению, после чего преподаватель производит короткий разбор задачи. Рекомендуется в течение одного занятия применять оба метода, решая одну-две задачи на доске, остальные — в тетрадях.

Для активизации самостоятельной работы студентов полезно изредка предложить каждому из них решить индивидуальную задачу, написанную преподавателем на специальной карточке. Карточка у студентов, решивших свои задачи, можно обменять.

На практических занятиях рекомендуется решать два вида задач: на подстановку в формулы и комбинационного характера, т. е. задачи, ход решения которых сразу не очевиден. Сначала надо решать задачи на подстановку в формулы, как более простые, с таким расчетом, чтобы оставить время на решение одной-двух комбинационных задач; при этом надо учить студентов отыскивать «ключ» к решению задачи, тренируя их остроумие и находчивость, а не учить только «подставлять и получать», что часто делают неопытные преподаватели.

При решении задач учащиеся допускают часто следующие ошибки:

- 1) применяют неправильные формулы или не те формулы, которые нужны в данном случае;
- 2) в правильные формулы делают неправильные подстановки часто не в той системе единиц;
- 3) делают арифметические ошибки;
- 4) запись производят путанно, неясно;
- 5) применяют нестандартные обозначения.

Все ошибки надо тут же тщательно исправить, разъяснить их смысл и потребовать точной, четкой и культурно оформленной работы. В ходе решения задач надо научить студентов делать правильно записи: сначала формула, затем цифровая подстановка в том порядке, в котором буквы стоят в формуле, затем окончательный результат с указанием единиц измерения. Часто учащийся не пишет общей формулы и сразу подставляет цифры, сделав к тому же часть вычислений в уме, так что через некоторое время он сам не сможет разобраться в своих записях. Правильная запись будет дисциплинировать студента и окажет помощь при подготовке к экзаменам. Надо обращать внимание на выбор обозначений величин. Запись единиц измерения необходимо делать по стандарту и раз навсегда установить, как их писать. Выполнение стандартов надо требовать непрестанно и научить пользоваться ими.

4. Роль преподавателя на практических занятиях

Все усилия преподавателя должны быть направлены главным образом на то, чтобы заставить студентов активно участвовать в учебном процессе. Встречаются «сверхактивные» преподаватели, которые с начала и до конца практических занятий непрерывно говорят, объясняют, поправляют и, казалось бы, учат, учат и учат. Фактически же они делают все за учащихся, ничего с них не требуют, не дают им работать самостоятельно, сводят на нет их активность. Такой преподаватель не умеет учить. Встречаются и «ма-

лоактивные» преподаватели, которые полностью предоставляют студентов самим себе, не регулируют занятий, не дают нужных объяснений. Правильным следует считать такое поведение преподавателя, когда он организует занятие, зорко следит за ходом его и регулирует его, направляя студентов, а сам выступает, когда замечает неверное направление мысли, считает нужным устранить какой-либо организационный недочет или прийти кому-либо на помощь.

Практические занятия следует активизировать более частой сменой вызываемых. Нельзя долго держать студентов у доски. Это резко снижает активность остальных, рассеивает их внимание. Они перестают участвовать в процессе решения и вяло переписывают действия с доски в тетрадь. Вызывать к доске нужно и сильных и слабых студентов по четыре-пять человек за час и притом не по алфавиту, так как в этом случае многие, ожидая своей далекой очереди, будут вести себя пассивно. Сильных вызывают для показа верного решения, а также в воспитательных целях для демонстрации слабым и нерадивым, как надо работать. Слабых — для проверки и одновременно для активизации их работы. Следует вызывать и желающих. Молодежь любит поощрения, и надо дать возможность подготовившимся студентам показать свои знания. Вопросы следует задавать не только тому, кто стоит у доски, но и остальным. «А вы как думаете? Правильно ли решается задача? Чем вы можете дополнить решение?» и т. п. Этот прием не позволит группе бездействовать и активизирует ее работу.

За все ответы надо тут же ставить оценку и записать ее в журнал учета. Этот прием сильно активизирует группу. Видя, что каждый ответ его оценивается и оценка фиксируется, студент с большим вниманием и напряжением относится к делу. Но преподаватель не должен относиться к оценке формально, ограничиваясь одной цифрой (баллом). В журнале учета преподавателя каждому студенту должно быть отведено место, достаточное для того, чтобы вписать туда характеристику ответа и, если нужно, то и самого отвечающего. Например: «Васильев неожиданно показал хорошие знания», «Иванов заучил формулы, но не понимает их», «Алексеев не понимает и не знает таких-то вопросов» и т. п. Все оценки и мотивация их должны сообщаться студентам, чтобы они могли сделать из них необходимые выводы.

Для увязки лекций с практическими занятиями руководители последних должны аккуратно информировать лектора о результатах занятий, о вопросах, упущенных или слабо освещенных в лекциях и т. п. Они сами должны посещать лекции. Идеальным было бы посещение лекций всеми руководителями практических занятий. Для начинающих преподавателей это обязательно. Лектор должен регулярно посещать практические занятия для руководства работой своих ассистентов, учитывать их замечания, помогать им, рекомендуя задачи и методы их решения. Крайне желательно, чтобы лектор брал на себя руководство практическими занятиями одной из своих групп. В этом случае он сам выявит вопросы, плохо поня-

тые его слушателями, и выяснит, на что следует обратить внимание в дальнейшем.

Весьма важным является знакомство преподавателей с особенностями работы молодых инженеров на производстве и с затруднениями в их деятельности на заводах, в проектных и научных организациях, что будет способствовать выбору актуальных задач для решения их на практических занятиях.

1. Роль лаборатории в учебном процессе

Громадная роль лабораторий в учебном процессе является бесспорной; на их организацию, оборудование и эксплуатацию расходуются очень большие средства, они занимают значительное место и в учебном плане и в «жилплощади» технического учебного заведения. Вместе с тем часто неправильное проведение работ в лабораториях снижает эффективность этих занятий; поэтому организации работы в лаборатории необходимо уделить большое внимание.

Основные задачи лабораторных занятий:

1. Связать теорию с практикой.— подтвердить опытом положения теории.
2. Ознакомить студентов с элементами устройств, измерительными приборами, машинами, установками и процессами, протекающими в них.
3. Привить навыки обращения с перечисленной аппаратурой и научить технике экспериментов.
4. Научить оформлять и обобщать результаты исследований.
5. Привить навыки научно-исследовательской работы и обучить ее методике.
6. Использовать занятия в лаборатории для контроля самостоятельной работы студентов над теорией.

Лабораторные занятия требуют от учащихся еще большей самостоятельности и активности, чем практические занятия. Они воспитывают студентов в духе строгой ответственности за качество их работы, а поэтому заставляют глубоко осмысливать ее, приучают к критической оценке своих действий и учат суммировать и обобщать итоги работы.

Приходя в учебную лабораторию, учащийся должен знать теорию исследуемого вопроса, так как целью работы в лаборатории является проверка на опыте в реальных условиях выводов этой теории, сделанных обычно с допущением ряда упрощающих предположений. Опыты, хорошо иллюстрирующие теорию, будут способствовать лучшему усвоению изучаемой дисциплины.

2. Место лаборатории в учебном процессе

Работы в лаборатории могут выполняться после прохождения всего теоретического курса или одновременно с его чтением. Последовательный вариант организационно более удобен и имеет несомненное преимущество в том отношении, что учащиеся приходят в лабораторию лучше подготовленными, знают весь круг вопросов и выполняют работы более уверенно. Но это преимущество достигается дорогой ценой: за счет качества усвоения лекционного курса, так как лабораторные занятия плодотворно влияют на понимание лекций, уточняя и конкретизируя их. Преподаватели, в особенности давно читающие лекции, часто забывают о том, как трудно студентам конкретизировать схемы, диаграммы и теоретические выкладки. Когда преподаватель на доске рисует, например, кружок с двумя квадратами, касающимися его по линии диаметра, он сам ясно видит «живую» электрическую машину постоянного тока с якорем, коллектором и щетками, а каково приходится студенту, если он не видел такой машины?

Последовательный метод, позволяющий студентам получить в лаборатории конкретное представление о предмете только по окончании курса лекций, не в состоянии облегчить усвоение последних.

Параллельный метод значительно выгоднее в этом отношении. Работа в лаборатории, параллельная слушанию лекций, способствует конкретизации теории, улучшает ее понимание, заставляет систематически заниматься теорией, поднимает интерес к курсу и вполне соответствует основному принципу советской науки — тесной связи теории с практикой.

Работа в лаборатории позволяет преподавателю проконтролировать самостоятельную работу студентов над курсом и вовремя принять меры в том случае, если эта работа недостаточна или неуспешна. Особенно важен этот момент для курсов, не имеющих в учебном плане практических занятий или имеющих их очень незначительное число, когда нет возможности осуществить контроль за самостоятельной работой учащихся на практических занятиях.

По всем изложенным соображениям надо считать более рациональным параллельный метод проведения лабораторных занятий. При этом оптимальным является *фронтальный метод*, когда все выполняют первую работу, после того как материал по ней изложен на лекциях, затем вторую и т. д. Очевидно, что этот метод требует наличия в лаборатории большого числа однородных работ. В лаборатории электрических цепей этот метод осуществить легко, так как схемы работ состоят из измерительных приборов, реостатов, катушек и конденсаторов, которые можно комбинировать надлежащим образом. Трудней его осуществить в лаборатории, где довольно сложные установки, например, при изучении свойств электрического и магнитного полей. Если в лаборатории электромагнитного поля ограничиться моделированием различных полей с помощью проводящей бумаги (см. гл. XI, п. 2), фронтальный метод также легко

осуществим, но тогда более сложные работы по поверхностному эффекту и распространению удастся лишь демонстрировать.

Там, где фронтальный метод невозможен, целесообразно применить компромиссный параллельно-последовательный, т. е. *цикловой метод*. Работы в лаборатории разбиваются на 2—4 цикла; первый цикл начинается после того, как лектором прочитан необходимый материал; в течение выполнения работ первого цикла продолжается чтение лекций и учащиеся получают сведения, необходимые для работ второго цикла и т. д. При этом в каждом последующем цикле целесообразно работы несколько усложнить, а в последний раздел теоретического курса включить, по возможности, материал, не освещаемый в лаборатории.

Однако цикловой метод сохраняет некоторые недостатки последовательного метода: 1) работают по одной теме, изучают другую; 2) каждый цикл теоретического курса испытывает благотворное влияние практики с некоторым опозданием.

Необходимо упомянуть об опыте Московского энергетического института, где работы по волноводам в лаборатории электромагнитного поля по организационным причинам опережали лекции. Студенты могли себе представить процессы в волноводах по аналогии с известными уже им длинными линиями, производили измерения и, ознакомившись с волноводной техникой, легче воспринимали сложную теорию волноводов на лекциях. Возможно, что в этом частном случае такой метод оказался допустимым, но в общем случае нельзя рекомендовать проводить лабораторию раньше лекций.

3. Содержание работ в лаборатории

Характер и темы работы в лаборатории выбираются таким образом, чтобы они соответствовали существу изучаемого курса. Поэтому каждая лаборатория должна получить свое собственное лицо, а поставленные в ней работы — отражать ее специфику. Так, работы, освещающие явления из области электричества и магнетизма, должны служить иллюстрацией законов, управляющих этими явлениями, измерения в этих работах должны играть лишь подсобную роль, в лаборатории же электрометрии они, очевидно, должны стоять на первом плане. Например, работа «Измерение электродвижущей силы методом компенсации» уместней в лаборатории электрометрии, для изучения же идеи компенсации можно поставить в лаборатории электрических цепей работу «Потенциальная диаграмма схемы компенсации». Каждая работа должна освещать какой-либо вопрос или раздел курса, повторений быть не должно. Общее число работ должно быть минимальным: При цикловом методе работы каждого цикла должны быть родственными и соответствовать одному большому разделу теоретического курса, что обеспечивает систематичность и последовательность усвоения. Так, например, по курсу электрометрии целесообразно первый цикл

посвятить приборам непосредственной оценки, второй — методам измерений. Работы цикла должны дополнять друг друга и не иметь повторений. Ниже в качестве примера приводится программа первого цикла лаборатории электрометрии:

Работа 1. Электромеханические свойства приборов. В ней исследуются моменты вращения, противодействия, успокоения, трения и небаланса на примере электромагнитных приборов.

Работа 2. Магнитоэлектрические приборы. В этой работе прибор поверяется как амперметр, градуируется как вольтметр, производится расширение пределов измерения с помощью шунта и добавочного сопротивления и составляются схемы омметров.

Работа 3. Выпрямительные, электронные и термоприборы. Здесь методы проверки и градуировки считаются известными и исследуются особенности указанных систем.

Работа 4. Ваттметр электродинамической системы. Ваттметр поверяется методом раздельного питания и изучаются погрешности схем включения.

Работа 5. Счетчик индукционной системы. Счетчик поверяется с помощью образцовых, уже изученных приборов — вольтметра, амперметра и ваттметра и исследуется специфика счетчика — чувствительность, самоход и т. п.

Работа 6. Гальванометры. Здесь на примере простого и баллистического гальванометров в основном исследуется различный характер движения подвижной части прибора.

Таким образом, в этом цикле изучаются:

- 1) общие свойства всех прямопоказывающих приборов;
- 2) ряд систем приборов — магнитоэлектрическая, электромагнитная, электродинамическая, выпрямительная, электронная, термоэлектрическая, индукционная;
- 3) ряд приборов различных типов — амперметры, вольтметры, ваттметры, счетчики, омметры;
- 4) методы поверки, градуировки и расширения пределов;
- 5) характер движения подвижной части.

В результате студент получает исчерпывающее представление о приборах непосредственной оценки. Крайне желательно в каждой работе предусмотреть, помимо обязательной программы-минимум, дополнительные задания для каждой бригады. Например, в лаборатории электрических цепей в работе по резонансу, кроме обязательного исследования при неизменном напряжении, можно задать провести исследование при неизменном токе, в работе по методу узловых напряжений — второй опорный узел и т. п. Это заметно повышает интерес студентов и их самостоятельность. Особо успешным из них полезно давать дополнительные работы по каждому циклу.

Очень важно правильно определить объем каждой работы и времени, отводимого на нее. Опыт показывает, что в лабораториях ТОО оптимальным временем являются три часа. Однако общий недостаток времени заставляет ставить двухчасовые работы. Программа работ должна соответствовать отводимому на нее числу

часов; ни в коем случае нельзя перегружать программу, заставляя проделывать работы в атмосфере спешки. Вместе с тем практика показывает, что на одну и ту же работу в первые дни уходит больше времени, чем впоследствии, когда учащиеся уже освоились с лабораторией. Поэтому первые работы проходят более напряженно и нуждаются в большей помощи преподавателя.

Желательно, чтобы отчеты по работам походили на правильно составленный протокол научного эксперимента или заводского испытания, т. е. содержали бы схему исследования, перечень примененных приборов, таблицы наблюдаемых и вычисленных величин, графики и характеристики, построенные по достаточно большому числу точек, и анализ полученных результатов. Однако, учитывая значительную загрузку студентов домашней учебной работой, приходится сокращать обязательное содержание отчета за счет уменьшения до минимума числа характеристик, опытных и вычисленных точек; с этой точки зрения можно отказаться от приведения схем, если они содержатся в руководстве, а не составлялись учащимися самостоятельно, и не требовать громоздких и повторяющихся арифметических вычислений.

В Ленинградском политехническом институте имени М. И. Калинина в лаборатории электромагнитного поля, где студенты имеют большую самостоятельность и часто выполняют индивидуальные задания, по окончании работы в лаборатории проводится семинар, на котором представители бригад делают краткие сообщения о своих работах, что также может служить отчетом по работе.

4. Руководство к лаборатории

Особое внимание нужно уделить изданию руководства к лаборатории. Машинописные описания, находящиеся в лаборатории, явно недостаточны, так как не позволяют учащимся готовиться к работам. Опыт показывает, что краткие руководства, содержащие лишь описание схемы, программу работы, ссылки на литературу по теории работы — не достигают цели. Учащиеся не читают рекомендованной литературы и готовятся к работам по краткой программе.

Необходимы руководства к лаборатории, дающие полный очерк по каждой работе, освещающие их теоретическую и практическую части. Эти руководства должны иметь минимальный объем и содержать лишь абсолютно необходимый материал. Если по теоретической части курса можно пользоваться стандартными учебниками, то стандартные руководства к лаборатории создать трудно из-за разнотипности оборудования. Все же в первую очередь необходимо изучить существующие печатные руководства и продумать возможность приспособления к ним лаборатории или составления к ним небольших добавлений.

Руководство, по существу, предопределяет характер работы в лаборатории и степень самостоятельности учащихся. Руководство

к лаборатории, проходимой на младшем курсе, должно приучить учащихся к методике ведения экспериментальных исследований. Оно должно содержать подробную программу работ, схемы соединений, формы таблиц и т. п. Руководство для старших курсов должно предоставлять работающим больше самостоятельности и являться по существу теоретическим обоснованием задания, выполнение которого поручается учащемуся: он должен сам составлять схемы, таблицы записи, форму протокола и т. п. Но во всех случаях руководства, напоминая инструкции завода, прилагаемые к выпускаемому им установкам («включить рубильник 1, установить напряжение 120 В с помощью реостата 2, записать показание амперметра 3 и т. д.»), являются порочными. Они препятствуют выполнению основной учебной цели и осмысленному овладению техникой работы.

Большое внимание следует уделить протоколу выполненной работы. Для младших курсов необходимо составить форму протокола, который должен приучить работающих к записям всех необходимых данных — обстановки опытов, данных приборов и т. п. Желательно ввести печатные бланки протоколов. Вместе с тем нельзя подменять протоколом самостоятельную работу; нельзя забывать, что студенты должны учиться и в процессе составления протоколов. С этой точки зрения неудачны бланки некоторых лабораторий, предлагающие студентам вписать несколько цифр, все же остальное, в том числе расчетные формулы, уже отпечатано на бланке. На старших курсах, как уже было сказано, формуляр протокола должен составляться учащимися.

5. Проведение лабораторных занятий

Учащиеся должны приходить в лабораторию хорошо подготовленными; для этого необходимо предварительно проводить опрос в объеме руководства к лаборатории. При фронтальном методе работы целесообразен опрос перед каждой работой. Так, в лаборатории ТОО Московского энергетического института на коллоквиуме по каждой работе студент должен предъявить указанные в руководстве к лаборатории материалы по теме работы: составленный им бланк протокола и выполненные расчетные задания, а также подготовить ответы на вопросы «опросного листа».

При цикловом методе работы циклы органически связаны между собой: как видно из приведенного выше примера первого цикла лаборатории электрометрии, последующие работы предполагают знание предыдущих. При шести работах этого цикла только $\frac{1}{6}$ всех учащихся будет делать работы, начиная с первой, остальным придется выполнять их в другой последовательности. Поэтому при этом методе более целесообразным представляется предварительный коллоквиум сразу по всему циклу. После сдачи коллоквиума по всему циклу работа в лаборатории проходит более организованно, так как студенты не отрываются для опроса, а у преподавателя остается больше времени для непосредственного руководства сту-

дентами. Однако некоторые из преподавателей настаивают на том, что и при цикловом методе целесообразней проводить опрос перед каждой работой, так как материал коллоквиума быстро забывается. Время для этого предлагается выделять накануне дня занятий.

Крайне желательно, чтобы студенты составляли отчет тут же в лаборатории. Если это невозможно, следует добиваться того, чтобы отчет составлялся в ближайшие дни, когда работа еще свежа в памяти.

Важным условием успеха работ в лаборатории является четкая их организация:

1. Перед каждым лабораторным циклом или занятием сдается вступительный коллоквиум. Допуск к работе получают лишь те студенты, которые усвоили содержание работ и необходимый минимум по их теории.

2. Оптимальной является система, когда каждая работа в лаборатории выполняется студентами индивидуально. Однако в ряде случаев один исполнитель экспериментировать не может, например, невозможно одновременно производить регулировку и записывать показания нескольких приборов. Кроме того, индивидуальная система требует постановки большого числа работ. Поэтому в большинстве случаев приходится создавать лабораторные бригады, но их состав надо доводить до минимума. Опыт показывает, что в лаборатории теоретических основ электротехники в бригаде должно быть не больше двух студентов; остальные члены бригады участвуют в работе чисто формально.

3. Преподаватель следит за работой учащихся. Работа считается выполненной, если черновик отчета подписан преподавателем, подтверждающим тем самым правильное выполнение всей ее программы.

4. Отчет по лабораторной работе, конечно, индивидуальный, вместе с черновиком должен быть представлен на текущем или ближайшем лабораторном занятии. Без этого отчета студенты к новой работе не допускаются. Преподаватель, обходя рабочие места, принимает в результате опроса эти отчеты или бракует их; последнее не является препятствием для выполнения текущей работы.

5. Зачет по лаборатории считается принятым, когда сданы отчеты по всем работам; тогда заключительный коллоквиум излишен.

6. Для отставших студентов занятия должны быть организованы так, чтобы указанный порядок не был нарушен.

Необходимо сделать одно весьма существенное замечание о методике проведения экспериментов в лаборатории. Очень часто учащиеся, ведя опыт, механически записывают показания приборов, не разбираясь в них, и только дома при обработке отчета вникают в существо дела. Такая методика сводит почти на нет пользу от лаборатории и равноценна домашней работе на построение графиков и выполнение расчетов по заданным цифрам. Нужно активизировать лабораторные занятия таким образом, чтобы центр тяжести переместился от составления отчета на непосредственное выполне-

ние работы в лаборатории. Следует сначала проводить опыт без всяких записей, наблюдая самый процесс, заметить пределы изменения величин и выбрать удобный масштаб для графиков. Затем опыт повторяют и каждую точку его тут же наносят на график. Для этого в руководстве по каждому опыту должны быть рекомендованы независимая переменная и главные функции, например, при исследовании резонанса напряжений в качестве независимой переменной принимается частота, в качестве функций — ток и напряжения на реактивных участках. Графики обязательно представляются с черновиком отчета; в ряде случаев представление чистовых графиков является излишним.

Такая методика имеет следующие важные преимущества:

- 1) учащийся следит по точкам за ходом опыта, поневоле вникая в его сущность;
- 2) сразу обнаруживаются ошибочные точки, которые тут же могут быть проверены, выявляются и «особые» точки кривых;
- 3) студенты приучаются к обычной методике ведения экспериментальной научной работы.

Вместе с тем эта методика требует больше времени и встречает противодействие у учащихся, которое должно быть преодолено настойчивостью преподавателя.

6. Роль преподавателя в лаборатории

Первым руководителем лабораторных занятий должен быть лектор, читающий курс. Излагая отдельные вопросы, он должен показать необходимость в лабораторной проверке теоретических положений, изложить содержание работ и методику работы в лаборатории.

Коренной особенностью лабораторных занятий — их самостоятельностью — определяется и поведение преподавателя, непосредственно проводящего лабораторные занятия. Руководство этими занятиями лишь внешне менее активное, чем практическими, требует от преподавателя большого напряжения и умения. В основном роль преподавателя заключается в организации работы в соответствии со сказанным выше. Преподаватель должен быть требователен на всех стадиях работы: при приеме коллоквиума, при проверке схемы и предварительном просмотре протоколов, при приеме отчетов. Он должен уметь все замечать, следить за сознательным выполнением работ, в частности, за построением кривых и давать необходимые советы и разъяснения, но в разумной дозе. Не нарушая самостоятельной работы студентов, преподаватель должен своевременно обнаружить крупные ошибки, предупредить развитие их, попутно разъяснить их сущность и указать верный путь. Мелкие ошибки, пока их не заметил сам учащийся, исправлять не следует, так как на этих ошибках студенты учатся основательнее, чем на предупреждениях преподавателя.

Можно рекомендовать ликвидировать письменный стол преподавателя в лаборатории. Преподаватель должен обходить рабочие столы и стенды, по ходу беседы опрашивать студентов и тут же принимать отчеты по выполненным работам.

Целесообразно, чтобы лабораторными занятиями руководил тот же преподаватель, который ведет и практические занятия. Очень важным для преподавателей является периодическое знакомство с работой в заводских и научно-исследовательских лабораториях.

7. Оборудование лаборатории

В заключение следует остановиться на оборудовании работ в лаборатории и самой лаборатории. Работы и установки должны быть тщательно и красиво оформлены. Это воспитывает у учащихся культуру работы. Провода, с помощью которых собираются схемы, желательно иметь одного цвета и большого сечения — для сборки главной цепи и другого цвета и малого сечения — для включения вольтметров и параллельных цепей других приборов, благодаря чему собранная схема будет иметь более наглядный вид; провода должны иметь удобные наконечники. Вместе с тем, не следует в угоду внешнему виду поступать сутью дела; на младших курсах, как правило, недопустимы уже готовые, собранные схемы: учащийся сам должен их собирать с помощью «летучих» соединений. Только на старших курсах, когда проблема сборки схемы является пройденным этапом, можно для экономии времени допустить исследование уже собранных установок.

Необходимо принять все меры к тому, чтобы были использованы установки, аппаратура и измерительные приборы, выпускаемые советской промышленностью: в лабораториях нужно воспитывать патриотизм учащихся, которые с чувством гордости должны оценивать достижения нашей промышленности. Старое оборудование рекомендуется показать на выставке, расположенной здесь же, иллюстрирующей ход и темпы технического прогресса в изучаемой области. Лаборатория должна быть украшена портретами отечественных и зарубежных ученых этой области науки, но обязательно с краткими аннотациями, в которых указаны основные даты жизни и работы.

Учебная лаборатория должна непрерывно развиваться, старые работы надо заменять новыми, более полезными, интересными и современными. К постановке этих работ желательно привлекать особо успевающих студентов и членов научно-технических кружков. Но эти новые работы можно включать в число обязательных только тогда, когда они уже хорошо отработаны и по ним составлено и отпечатано руководство. Новые учебные работы, их модернизация, методика проведения занятий в лаборатории, успехи и неудачи учащихся должны служить предметом обсуждения на заседаниях кафедр.

**1. Задачи студентов
и преподавателей**

Работа студентов состоит из занятий в учебном заведении — в аудитории, лаборатории и т. п. и дома. Обязательное посещение всех видов занятий, обязательное выполнение учебного плана каждого дня, недели, месяца и года требует от студентов четко организованной и систематической работы во всех ее звеньях. Если некоторые хорошо успевающие студенты будут освобождены от обязательного посещения отдельных видов занятий, они смогут выполнить учебный план также только при систематической работе.

Все преподаватели — лекторы, руководители практических и лабораторных занятий и т. д. — обязаны помочь студентам в рациональной организации их работы и контролировать ее не только на заключительном этапе, принимая зачеты и экзамены, но и в течение семестра. Легче всего организация и контроль работы студентов осуществляется на практических и лабораторных занятиях, где преподаватель непосредственно руководит небольшой группой учащихся, трудней — на лекциях; в особенности труден контроль их домашней работы.

Интересен давший положительные результаты метод кафедры ТОЭ Ленинградского политехнического института имени М. И. Калинина, стимулирующий самостоятельную работу студентов, начиная с первой лекции. Начальная часть курса — основные понятия и законы теории поля и теории цепей, где обобщается и углубляется материал, известный студентам из курса физики, и теория цепей переменного тока до символического метода — излагается на лекциях в краткой форме. Студенты обязаны проработать этот материал самостоятельно по учебнику, составляя по нему конспект, что проверяется на практических занятиях опросом по конспекту и небольшой контрольной работой. Уже на пятой неделе проводится полноценная контрольная работа по теории и решению задач. При положительной ее оценке на вопрос по этой части курса студент на экзамене отвечает без вывода формул. Этот метод дает также экономию лекционного времени, используемого при изложении дальнейшего материала уже обычным образом.

2. Слушание и запись лекций

Лектор своими советами должен помочь студентам правильно организовать слушание лекций. На лекции студенты должны внимательно слушать лектора, следя за ходом его мыслей, и вести запись лекции. Запись лекций в обработанном виде — одно из основных учебных пособий студента. Запись полезна и потому, что к запоминанию привлекаются, кроме слуховой, зрительная и двигательная память. Вместе с тем правильная запись является сложным делом — трудно распределять внимание на ряд направлений: выбирать главное, писать, иногда своими словами, зарисовывать чертежи и плакаты, фиксировать результаты опытов и т. д. Средняя школа мало тренирует учеников в этом направлении; этот недостаток должен быть исправлен в высшей школе, где от студентов необходимо требовать квалифицированную запись лекций.

Многие студенты при молчаливом одобрении преподавателей стремятся записать лекцию дословно. Это совершенно ненужное дело отвлекает их от главной задачи: установка «на запись» не позволяет им вдумываться в смысл лекции, в ее существо, следить за ходом мыслей лектора. Запись сплошь и рядом получается неполной, вместо основных мыслей фиксируются несущественные, вместо узловых вопросов — случайно схваченные второстепенные детали.

Научно-методический совет по теоретическим основам электротехники и инженерной электрофизике дал кафедрам по этому вопросу следующую рекомендацию: «Принять меры к правильной постановке конспектирования лекций..., рекомендуя студентам делать краткие записи основных научных положений, разъясняя при этом нецелесообразность и невозможность дословной записи лекций».

Продуктивная запись должна фиксировать основные мысли лектора, узловые места лекции, ход расчетов, формулы и их преобразования. Запись следует вести на одной стороне листа, оставляя другую сторону свободной для внесения добавлений в ходе домашней проработки материала. Запись ведется скорописью с большими расстояниями между словами. Слова можно записывать сокращенно с тем, чтобы позже дополнять их. Часто встречающиеся термины надо заменять условными обозначениями: общепринятыми (э. д. с., к. п. д.) или своими, например, «эка» — электротехника и т. п. Надо пользоваться различной нумерацией (римской, арабской, буквенной) для систематизации отдельных положений и разделов лекции.

Если вся канва лекции, все узловые места, определения, ход выводов, окончательные формулы будут записаны, то сочетание такого конспекта с учебными пособиями другого типа даст большой эффект. Конечно, не может быть и речи о замене конспектом учебника, о чем говорилось выше.

Все указанные выше особенности записи должны учитываться лектором. Он не должен диктовать свою лекцию. Нельзя полностью считаться с мнением некоторой части слушателей, негодующих на

то, что лектор «так быстро читает, что записывать за ним невозможно». Очень быстро читать, конечно, не следует, так как «скороговорка» препятствует не только записыванию, но, что еще важнее, пониманию лекции. Темп лекции должен быть таким, чтобы слушатели могли свободно следить за ходом мыслей преподавателя и понимать их. Узловые места надо читать медленнее, можно и продиктовать их.

Записи студентов полезно проверять, для того чтобы учить их записывать лекцию и чтобы получить представление об отношении студентов к учебе, об их активности и внимании на лекции. Но надо иметь в виду, что качество записи лекции не характеризует полностью уровня знаний студента.

Как уже сказано, запись лекции является только одним из учебных пособий. Студенту предстоит после лекции изучать учебник, а на старших курсах и другую более сложную литературу. Преподаватели обязаны внимательно подбирать дополнительную литературу и рекомендовать ее слушателям. Студентов старших курсов следует приучать к чтению специальной технической литературы и технических журналов, таких, как «Электричество», «Вестник электропромышленности», «Автоматика и телемеханика», «Электрические станции», «Измерительная техника» и др. Кроме того, надо советовать читать зарубежные журналы по этой тематике; для этого студенты и изучают иностранные языки.

3. Домашняя работа студентов

Домашняя работа студентов состоит из изучения материалов программы по записям лекций и учебникам, выполнения домашних заданий, отчетов по лаборатории, курсовых и дипломных проектов и др., а также из подготовки к зачетам и экзаменам. Вся эта работа должна проводиться систематически, а для этого она должна быть тщательно спланирована самим учащимся. Молодой студент, привыкший к школьному режиму, этого часто не понимает. В средней школе он посещал занятия по расписанию, готовил заданные уроки и не мог сам выбирать тем для занятий. Ученик работает систематически, но эту систему обеспечивает ему школьный режим. Когда он попадает во вуз, ему может показаться, что здесь имеется полная свобода организации работы. Но свобода эта только кажущаяся: она касается лишь некоторой возможности планировать свою домашнюю работу. Эта возможность предоставляется в расчете на то, что студенты — взрослые уже люди, интересующиеся своей специальностью, — будут работать добросовестно, с увлечением и скоро поймут, что систематическая работа им абсолютно необходима, что она гораздо экономнее по времени и что знания в этих условиях усваиваются прочнее. Преподаватель должен развивать у студентов самостоятельность в работе и навыки планирования, необходимые в любом виде деятельности.

Молодые студенты, не имеющие опыта и считающие, что можно работать без плана, запускают занятия и, будучи не в состоянии нагнать пропущенное, перестают понимать лекции, не справляются с решением задач на практических занятиях, а работы в лаборатории выполняют механически.

Организация домашней работы дается студентам нелегко, и преподаватели обязаны помогать и в этом отношении: следить за ходом их работы дома и приходить на помощь хотя бы советами. Вполне целесообразна организация в начале семестра общефакультетских лекций опытных преподавателей по вопросам организации, методики и планирования домашней работы: надо «учить учиться».

Прежде всего надо приучить студентов составлять личный план. Такое требование нельзя считать «увлечением планированием». Личный план — необходимое условие организованной систематической работы. Составить его нетрудно, а польза от него большая. Исходя из расписания занятий и распорядка дня, студент должен продумать и составить свой план работы дома вечером и в выходные дни, учтя при этом и организацию своего досуга. Составляться план может по-разному, но выполняться он должен точно. Ничто так не закаляет волю, как настойчивое выполнение принятых решений, и, наоборот, ничто так не «размагничивает» человека, как невыполнение намеченного.

Можно рекомендовать следующий порядок вечерней работы студента. Сначала выполняется наиболее трудная ее часть: изучение учебного материала по записи лекций, прослушанных в этот же день. Прочтя свою запись, откорректировав и дополнив ее тем, что еще свежо в памяти, студент берется за учебник. Очень хорошо, если он будет пользоваться не одним, а несколькими учебниками, сравнивая различные методы изложения, но для среднего студента достаточно одного из них, особенно на младших курсах, для которых изданы прекрасные учебники. Приступая к работе над учебником, студент отыскивает нужные ему места по оглавлению, предметному указателю или по указаниям преподавателя. Читать книги можно по-разному. Одни читают медленно, улавливая и уясняя мысль за мыслью (аналитический тип), другие быстро перелистывают, пробегают ее, часто возвращаясь к прочитанному, забегая вперед (синтетический тип). Первые хорошо усваивают, главным образом, конкретные факты, вторые получают общее представление о всей книге, плохо запоминая детали. Учебный материал следует изучать обоими способами: сначала рекомендуется беглый просмотр, чтобы видеть, о чем идет речь, каков ход мыслей автора, каких вопросов он коснулся и о чем говорится в начале, середине и конце раздела. Только после этого следует внимательно читать подряд, взяв карандаш и делая записи и математические преобразования, которые в книге пропущены. Эти записи лучше делать на свободных страницах конспекта. Здесь же рекомендуется сделать дополнительные выкладки, добавления из книги и т. д. В процессе проработки надо отметить все неясное и сформулировать вопросы, которые следует задать преподавателю на консультации.

Так должны работать хорошие студенты. Однако это не идеал подготовки. Более способным следует рекомендовать внимательно прочесть материал по теме предстоящей лекции. Это позволяет студенту сознательно и критически относиться к материалу и изложению лекции, благодаря чему он воспримет ее со значительно большим коэффициентом полезного действия. Чтобы стимулировать такой метод работы, лектор, заканчивая лекцию и указав материал по прочитанной теме, должен указать, что именно из пройденного имеет отношение к следующей лекции и что надо прочесть к ней.

Для углубления знаний и конкретизации их надо рекомендовать систематически решать задачи. Сейчас созданы хорошие задачки почти по всем электротехническим курсам [4, 5, 6].

Следует обратить внимание студентов на необходимость своевременного выполнения домашних заданий и курсовых работ, так как тогда они выполняются легче и дают наибольший эффект. Нужно рекомендовать записи при выполнении домашних заданий строить логично, выделять результаты расчетов, например, подчеркивая цветным карандашом; записи должны иметь такую форму, чтобы было видно, откуда следуют те или иные выводы. Расчеты должны доводиться до окончательного арифметического результата, но без чрезмерной точности, неразумной с инженерной точки зрения. Во всех случаях необходимо требовать применения логарифмической линейки, также и при вычислениях с комплексами.

Нужно также приучать студентов технически грамотно составлять отчеты по лаборатории, правильно заполнять таблицы, вычерчивать графики.

4. Домашние задания и курсовые работы

Решение задач приносит пользу, но все же является школьным методом работы. Следует давать такие *домашние задания*, которые предусматривают более продолжительные расчеты и состоят из ряда этапов, в которых объединены несколько отдельных задач. Число и объем таких работ должны быть минимальными, а темы их охватывать лишь важнейшие вопросы курса. Очень хорошо придавать таким домашним заданиям вид инженерной расчетной работы. Это вызовет больший интерес у студентов.

Сейчас в учебных планах предусмотрены *курсовые работы*, по одной на весь семестр. Было бы неправильно сводить эту курсовую работу к решению задачи на одну узкую тему. Она должна состоять из разделов, отражающих в совокупности весь материал лекций за семестр. Так, например, хорошей первой курсовой работой по ТОЭ представляется полный расчет процессов в заданной двухпроводной линии передачи постоянного тока: после изложения на лекции темы «Емкость» учащийся выполняет приближенный расчет электрического поля этой линии передачи и ее емкости; когда

на лекциях переходят к изучению индуктивности, студент должен рассчитать магнитное поле и индуктивность своей линии передачи; изучая цепи постоянного тока, нужно сделать расчет сечения проводов этой передачи, подсчитать коэффициент полезного действия, рассмотреть режим короткого замыкания, режим передачи максимальной мощности и т. д., т. е. все то, что касается расчета цепей постоянного тока. Возможно, здесь следует добавить расчет при ответвлениях по длине линии, при питании с двух сторон и т. д. Задания отдельным студентам должны быть различными по мощности, напряжению и длине передачи.

По цепям переменного тока можно задать курсовую работу по расчету трехфазной схемы с нулевым проводом, для одной фазы которой сначала строится график мгновенных значений и производится расчет аналитическим, графическим и символическим методом, а потом строится круговая диаграмма; затем делается полный расчет трехфазной цепи как при синусоидальных, так и при несинусоидальных напряжениях фаз и рассчитывается переходный процесс в фазе, замыкаемой накоротко.

Второй вид курсовых работ — это задания, которые раньше с успехом давались автором по курсу электрических измерений. Последний читался без практических занятий, но студентам задавались индивидуальные темы рефератов обзорного характера, например, обзор и анализ систем приборов с точки зрения: 1) возможности их применения на постоянном и переменном токе; 2) температурных погрешностей; 3) возможности применения для измерения напряжения и тока; 4) выбора систем, позволяющих осуществить измерение мощности и т. д. Эти задания заставили учащихся внимательно слушать лектора и отмечать те сведения, которые им пригодятся в реферате. Желая шире осветить вопрос, студенты пользовались не только учебниками, но и журнальной литературой. Рефераты вызвали большой интерес, многие были хорошо написаны и иллюстрированы и принесли большую пользу их авторам. Подобные рефераты возможны и по другим дисциплинам.

При подготовке заданий необходимо придавать им индивидуализированный характер, чтобы исключить возможность заимствования. Если трудно или невозможно дать каждому принципиально разное задание, следует сделать их различными хотя бы по цифровому материалу. Для экономии времени здесь возможно применить метод вариантов, который проще всего пояснить на примере. В задании по теории переменных токов на расчет цепи с последовательным соединением сопротивления r , индуктивности L и емкости C эти параметры задаются каждому в соответствии с его вариантом — 111, 112, ..., 132, ..., 333, всего 24 варианта (табл. 3).

Например, студент, имеющий вариант 312, выбирает первую величину из третьей строки первого столбца ($r=30$ Ом), вторую — из первой строки второго столбца ($L=0,1$ Г), третью — из второй строки третьего столбца ($C=150$ мкФ). Остальные величины, в данном случае напряжение и частота, одинаковы для данной группы и должны варьироваться для других групп.

ТАБЛИЦА 3

Вариант	r , Ом	L , Г	C , мкФ
1	20	0,1	50
2	25	0,12	150
3	30	0,15	200

Особое внимание следует уделить подбору цифровых данных. Например, в рассмотренном задании следует все варианты выбрать так, чтобы сопротивления трех участков при заданной частоте были одного порядка, причем реактивные сопротивления должны быть в несколько раз (3—5) больше активного. Это, во-первых, будет близко к реальным соотношениям в подобных цепях, применяемых в технике, а во-вторых, даст наглядные графики мгновенных значений и векторные диаграммы с соизмеримыми амплитудами. Приходилось видеть задания, выданные неопытными преподавателями, где затухание было настолько велико, что частотная характеристика была практически горизонтальной и резонанс не давал почти никакого эффекта, или, наоборот, настолько мало, что напряжения на индуктивности и емкости оказывались в сотни раз больше напряжения всей цепи и напряжения на активном сопротивлении; все эти величины приходилось наносить на диаграммы в разных масштабах, а тогда терялись наглядность и возможность графической проверки результатов. Очевидно, что эти замечания касаются заданий на любую тему.

Преподаватели должны на занятиях дать указания, как текстуально и графически оформлять задания, приучая учащихся к точным и систематическим записям и выбору удобных масштабов для графиков. Вместе с тем не следует доводить дело оформления до абсурда и отнимать без пользы время у студентов, например, на вычерчивание тушью.

5. Методы текущего контроля

Контроль за усвоением знаний и систематической работой студентов исключительно важен. Если студенты не будут заниматься дома, то хорошая лекция и практические занятия не дадут должного эффекта. Одно время в порядке контроля широко практиковалась краткая беседа — опрос в начале лекции в течение 4—5 мин по материалу предыдущей лекции. Потом это было признано школярством и такого рода опросы прекратились. Все же представляется, что эта мера полезна и не только для контроля. В хорошо построенной лекции должны быть созданы опоры для памяти повторением ранее изложенных положений, касающихся темы предстоящей лекции. Вместо того, чтобы делать такой обзор самому, выгд-

нее совместить его с опросом слушателей, попутно контролируя этим их самостоятельную работу. Одновременно этот опрос дает лектору возможность проверить, насколько усвоены его лекции, насколько доходчив и правилен его метод изложения. Нечего и говорить, что подобные опросы поднимают активность аудитории. Опрос имеет также воспитательное значение. Студенту неприятно проявить свое незнание в присутствии всех своих товарищей, что заставляет его ответственнее относиться к слушанию и к домашней проработке лекций.

Практические занятия построены таким образом, что контроль осуществляется в ходе занятий. Необходимо лишь периодически, раза два в семестр, устраивать плановые контрольные работы, обеспечивая при этом полную самостоятельность в работе студентов.

Прием домашних заданий должен быть очень тщательным и добросовестным. Организовать его следует так, чтобы студенты относились к сдаче заданий так же, как к защите своего инженерного проекта в будущем. Так же тщательно надо опрашивать студентов перед тем, как допустить их к выполнению работы в лаборатории. Коллоквиум по циклу из нескольких работ следует поставить так, чтобы был сделан обзор предстоящих работ и систематически охвачен весь материал. Чтобы ускорить процесс проверки, во время обсуждения первой работы следующий вызванный должен готовить ответ и схему по следующей работе. При этом методе можно успеть за два часа обсудить внимательно цикл из нескольких работ и проконтролировать знания учащихся всей группы.

Проведение занятий в лаборатории и прием лабораторных отчетов являются также прекрасным видом контроля. В ходе их необходимо внимательно наблюдать за работой студентов, тщательно просматривать черновики отчетов и проявлять строгую требовательность при сдаче чистовых отчетов, проводя при этом обязательно опрос по сути работы. В некоторых вузах существует правило, по которому студент, не сумевший защитить отчета, должен выполнить работу повторно или взамен нее — другую. Кафедра ТОЭ Московского энергетического института считает, что главное в лабораторных занятиях не последующие расчеты, выполняемые на основе показаний приборов, и составление отчета, а изучение самого явления, техника и методика лабораторного эксперимента. Поэтому центр тяжести проверки касается подготовки студентов к работе, после чего студентам предоставляется в лаборатории большая свобода. Отчет составляется тут же и подается в черновике.

Для контроля студентов и для подтягивания отстающих очень полезно другое мероприятие: групповые консультации с вызовом на беседу плохо успевающих студентов. Преподаватель, ведущий поток, рассматривает с ними пройденный материал в определенной последовательности, не допуская при этом никакого натаскивания. На подобные занятия являются часто по собственному желанию и хорошо успевающие студенты.

Во время приема всех видов работ и во время бесед преподаватель требует логичных и обоснованных ответов. В корректной, но настойчивой форме преподаватель отводит всякую «воду», требует содержательности и разумной лаконичности высказываний по существу вопроса.

При работе со студентами, освобожденными от обязательного посещения некоторых видов занятий, также необходим периодический контроль за их работой, в частности, за выполнением контрольных работ и домашних заданий наравне со всеми студентами их курса.

Результаты контроля за работой учащихся должны непрерывно фиксироваться преподавателем. Необходимо тщательно оценивать все выступления и записывать у себя результаты всех встреч с тем или иным студентом. Не следует, как уже было сказано ранее, ограничиваться только выставленной отметкой — необходимо кратко записывать характеристику ответа. Все это даст материал для семинаров, бесед с отстающими и при опросе на экзаменах. Студенты, которые хорошо занимаются, не нуждаются в таком серьезном контроле, но подобного рода записи будут весьма полезными при распределении, зачислении в аспирантуру и т. п.

6. Проведение зачетов и экзаменов

Основным методом проверки знаний во втузе являются экзамены. К их подготовке и проведению нужно относиться весьма серьезно. Составление экзаменационных билетов требует особого внимания. Одно время обсуждался вопрос, следует ли в билетах ограничиваться теоретическими вопросами или нужно включать также задачи. Дело в том, что задачи решались на практических занятиях и студент может прийти на экзамены только тогда, когда имеет по ним зачет. Отсюда можно сделать вывод, что с задачами покончено, и на экзаменах нужно заниматься только теоретическими вопросами.

Такой подход представляется несколько формальным. К каждому предмету необходимо подходить с учетом его особенностей. Так, например, теория электрических цепей постоянного и переменного токов имеет своей основной целью изучение методов решения задач на расчеты в этих цепях; здесь необходимо проверить не только знание теории, но и умение приложить ее к практике. Очевидно, что решение задач на экзамене в данном случае является желательным, поэтому в качестве одного из вопросов билета можно давать задачу по одному из методов расчета цепей. По курсу же электрических измерений целесообразно задачи в билеты не включать, а задавать их в отдельных случаях в качестве добавочного вопроса.

При составлении билетов надо стремиться, чтобы все они имели одинаковую трудность и чтобы в каждом билете нашли отражение основные разделы курса. Так, в билете по первой и второй частям

курса ТОЭ можно задать, например, вопросы по методу определения емкости, по теории линии передачи постоянного тока и задачу на расчет цепи постоянного тока. В билете по третьей части курса можно задать теоретические вопросы на синусоидальный однофазный ток, переходные процессы и задачу на токи сложной формы или трехфазный ток.

Ни в коем случае не следует включать один и тот же вопрос в несколько билетов, так как это может привести к тому, что находящиеся рядом студенты будут отвечать на один и тот же вопрос. Лучше подготовить меньше билетов и пускать их многократно в оборот; студенты, сдавшие экзамен, уходят, и повторение билета никакого вреда не принесет.

Как студент должен готовиться к ответу? Практикуется подготовка на месте (на бумаге) или у доски; иногда ответ готовится на месте, а потом студент выходит к доске, переписывает с бумаги на доску и только тогда отвечает. Подготовка ответа на доске обеспечивает большую самостоятельность. Преподаватель несколько раз проходит мимо готовящего ответ студента и наблюдает процесс подготовки: пишет ли отвечающий неправильный ответ, который потом стирает и т. п. Преподаватель, подходя к доске для опроса, уже многое знает об отвечающем. В результате этого опрос у доски отнимает гораздо меньше времени. Таким образом, подготовка и ответ у доски являются наиболее разумным методом приема зачета или экзамена.

Приходится наблюдать разнообразные методы ведения опроса. Некоторые преподаватели молча выслушивают ответ, не вмешиваясь, не поправляя, другие же проявляют большую активность и стараются на ходу переключить ответ в тот канал, который сами предпочитают. Этот последний метод явно неправилен. Нужно уметь спокойно выслушать то, что рассказывает отвечающий, задать ему дополнительные вопросы и оценить его ответ. На экзамене учить уже поздно, а нужно лишь получить данные для объективной оценки знаний. Если в билетах содержатся несколько вопросов, следует записывать оценку ответа по каждому из них. Если, например, сделана запись 5, 4, 4, можно уверенно дать общую оценку — хорошо, а в сомнительном случае задать дополнительный вопрос.

Нужно подготовить ряд простых вопросов и задач, которые должны выяснять понимание физических процессов. Часто прекрасные по форме ответы маскируют полное непонимание вопроса. Молодежь имеет прекрасную память, и некоторым легче выучить наизусть сложные выводы, чем разобраться в них по существу.

Требовательность на экзаменах должна быть весьма высокой, но не следует допускать излишнюю придирчивость и мелочность; основное, что надо выяснить — это наличие определенных знаний и понимание пройденного. Весьма важно на экзаменах создавать спокойную обстановку и рассеивать психическую напряженность студентов.

Если обнаружилось незнание хотя бы одного из двух или трех вопросов билета, есть все основания предполагать, что сдающий не

знает многое из 50—75 вопросов курса, содержащихся в остальных билетах, и такой студент должен получить неудовлетворительную оценку. Практикуемое иногда разрешение взять новый билет представляется совершенно недопустимым. Преподаватель, проявляющий «либерализм» на экзаменах, должен знать, что слух об этом быстро разносится по учебному заведению, и многие студенты перестают тщательно заниматься и готовиться по его курсу, переключая время и внимание на курсы и экзамены более требовательных преподавателей.

7. Факультативная работа

В обязательной программе курсов общепрофессиональных дисциплин, например ТОЭ, невозможно исчерпать все их содержание. Поэтому крайне желательно организовать чтение факультативных курсов. Они должны быть короткими — по 3—5 лекций и, следовательно, посвящены отдельным вопросам, например, электромеханическим аналогиям, магнитогидродинамике, развитию операторного метода и т. п. Эти курсы надо читать регулярно один за другим, в порядке логической последовательности. Опыт показывает, что всегда находится группа студентов, которые с интересом прослушают весь цикл лекций, большинство же проявляет интерес лишь к определенным темам.

Должны быть организованы и необязательные факультативные работы с интересующимися и успевающими студентами, в основном, в лабораториях; такого рода работы проводят обычно в студенческих кружках. В лабораториях целесообразно организовать бригады из 2—3 человек. На младших курсах и для отдельных студентов на старших курсах задания могут носить реферативный характер — им поручается разобрать тот или иной вопрос и доложить на заседании кружка; при этом необходимо дать список литературы. Следует практиковать реферирование статей в журналах («Электричество» и др.), отбирая наиболее интересные и соответствующие подготовке студентов. В лаборатории должны быть подготовлены работы, которые не входят в обязательный минимум; они могут выполняться кружковцами. Следует использовать помощь студентов при постановке новых работ.

Более высокий уровень имеют так называемые учебно-исследовательские работы. В некоторых вузах их включают в обязательный план. Они состоят из теоретической части, создания макетов и экспериментов с ними. Такого рода работы должны быть тщательно подготовлены и в ряде случаев могут заменить курсовой проект.

Кружковцев следует использовать для помощи в научно-исследовательской работе кафедры. Занимаются ею далеко не все, но студенты, которые включились в нее, проявляют к этой деятельности большой интерес. Руководя ими, преподаватель должен проявлять большую осторожность, чтобы не разочаровать студентов, не

оттолкнуть их от науки. Необходимо особо внимательное отношение к их идеям и проводимой ими работе.

На каждой кафедре должен систематически вестись семинар, где обсуждаются отдельные доклады, сообщения, рефераты книг и сообщений из журнальных статей, реферативных журналов. Семинары необходимо проводить не реже двух раз в месяц; они являются прекрасной школой для преподавателей. Необязательно ставить на семинаре обсуждение только законченных работ. Наоборот, нужно творчески обсуждать работы в процессе выполнения или те, которые только намечаются, которые зашли в тупик и т. д. Без такого семинара научная жизнь на кафедре будет только работой одиночек, на семинаре же сказывается влияние всего коллектива. На заседания семинара следует приглашать студентов, в особенности тех, которые участвуют в научно-исследовательской работе кафедры, и ставить их доклады.

1. Программа курса ТОЭ

Программа курса ТОЭ 1971 г. для электроэнергетических и электротехнических специальностей состоит из методических указаний, объяснительной записки, введения и четырех частей.

В объяснительной записке указывается на особое значение ТОЭ в связи с задачей дальнейшего повышения уровня научно-теоретической подготовки инженеров, поставленной XXIV съездом КПСС, рассматривается тесная связь теории электрических и магнитных цепей и теории электромагнитного поля и применение их в расчете и анализе сложных электротехнических устройств на основе происходящих в них физических процессов.

Во «Введении» должно быть указано на важную роль электротехники в создании материально-технической базы коммунизма в СССР, а отсюда — теоретического фундамента электротехники — курса ТОЭ, в начале изучения которого надо дать краткий исторический очерк о развитии науки об электрических и магнитных явлениях и их практическом использовании.

I частью программы курса являются «Основные понятия и законы теории электромагнитного поля и теории электрических и магнитных цепей».

II часть «Теория линейных электрических цепей» посвящена свойствам и методам расчета цепей со сосредоточенными параметрами при постоянном, синусоидальном, периодическом несинусоидальном токах и импульсных э. д. с. в установившихся и переходных режимах, теории четырехполюсников, синтезу электрических цепей, а также цепям с распределенными параметрами в установившемся режиме и при переходных процессах.

III часть «Теория нелинейных электрических (и магнитных) цепей» рассматривает нелинейные элементы и расчет цепей с ними при постоянном и периодическом токах, при переходных процессах, а также элементы теории колебаний.

IV часть «Теория электромагнитного поля» на основе уравнений Максвелла изучает электростатическое поле, электрическое поле постоянных токов, постоянное магнитное поле и методы их расчета, а также расчет электрических параметров: емкости, взаимоемкости, индуктивности и взаимоиндуктивности, а затем переменное электромагнитное поле в диэлектрике, проводящей среде, несовершенных диэлектриках, магнитодиэлектриках и ферромагнитных

средах. В заключение рассматривается излучение электромагнитных волн.

В новой программе 1971 г. несколько расширены методы матриц и графов, структурные схемы, синтез цепей, моделирование полей, методически более удачно расположены некоторые темы и включены сведения по основным новым направлениям, в частности — по магнитогидродинамике.

В программе по-прежнему уделяется большое внимание теории электромагнитного поля, что совершенно правильно, так как знание только теории цепей совершенно недостаточно для многих задач, с которыми приходится иметь дело инженеру-электрику. Так, автору этой книги при работах в области электроэнергетики пришлось воспользоваться методами расчета полей при определении индуктивностей и емкостей электрических цепей, магнитного рассеяния в электрических машинах, в основном лобовых частей обмоток, полей в машинах со сплошным ротором, при построении общей теории электрических машин, при определении полезных полей в электроизмерительных универсальных приборах, а также их помехоустойчивости и экранирования, а главное — в последние годы при разработке магнитогидродинамических машин.

Тем более очевидна необходимость теории поля для работ в области радиотехники, основанной на излучении, распространении и приеме электромагнитных волн.

2. О построении курса ТОЭ

Программа 1971 г. начинается с важного «Методического указания», отсутствовавшего в программе 1964 г.: «Настоящая программа является типовой, определяющей общее содержание курса. Руководствуясь ею, кафедры вузов разрабатывают свою рабочую программу. Рабочая программа, включая в себя содержание типовой, может иметь иную последовательность изучения разделов в соответствии с кафедральной методикой преподавания. При составлении рабочей программы ее авторы обязаны выделить некоторое количество лекционных часов на самостоятельный раздел, освещающий последние достижения науки и техники в данной конкретной области». Таким образом узаконено положение, фактически имеющее место на кафедрах многих вузов и отраженное в ряде учебников ТОЭ.

База ТОЭ — это теория электромагнитного поля, частными случаями которой является теория электрических и магнитных цепей. Так и построена книга известного венгерского ученого К. Шимони «Теоретическая электротехника» [8]. Ее первые две части (примерно 300 страниц из 750) посвящены сначала уравнениям Максвелла, затем постоянным полям — электрическому и магнитному. За этим следует третья часть — анализ и синтез электрических цепей (240 страниц) и последняя часть, посвященная электромагнитным волнам (210 страниц). В предисловии к книге К. Шимони редактор

ее перевода проф. К. М. Поливанов, автор собственных книг по ТОЭ, пишет: «...редактор выражает надежду, что... книга окажется полезным пособием для студентов, инженеров и аспирантов, стремящихся углубить свои знания в области теоретических основ электротехники, а также что она будет интересна преподавателям соответствующих курсов...», т. е. давая высокую оценку книги К. Шимони, в то же время не рекомендует ее в качестве основного учебника ТОЭ для студентов.

Поэтому почти все авторы учебников по ТОЭ в СССР единодушны, начиная курс после вводной части с теории цепей и заканчивая его теорией поля, т. е. соблюдая принцип: «от простого к сложному». При этом изложение отдельных частей курса по содержанию соответствует рассмотренной выше программе ТОЭ, построение же этих частей в различных учебниках отличается друг от друга. Помимо разницы в расположении материала есть разница в подходе к знаниям и возможностям учащихся: в некоторых учебниках к ним предъявляются более высокие требования, в других — меньшие. Есть учебники, рассчитанные не только на студентов, которые должны изучать не весь его материал, но и на аспирантов и ассистентов, готовящихся к сдаче кандидатского экзамена по ТОЭ.

Поэтому представляет интерес рассмотрение различных вариантов построения вводной части курса, теории электрических и магнитных цепей и теории электромагнитного поля в основных учебниках по ТОЭ: Л. Р. Неймана и др. [9], Г. И. Атабекова и др. [10], К. М. Поливанова и др. [11], Л. А. Бессонова [12], П. И. Ионкина и др. [13], Г. В. Зевеке и др. [14]. На базе этого обзора в дальнейшем излагается и обосновывается построение курса во II издании учебника ТОЭ автора настоящей «Методики» с его соавторами [3]. Этот учебник имеет минимальный объем и рассчитан только на студентов. Одной из основных задач его авторов была методика изложения материала, наиболее доступная для учащихся.

3. Первая часть в учебниках по ТОЭ

Учебник [9] построен в соответствии с программой курса ТОЭ 1964 г., в основном совпадающей с программой 1971 г.

В начале его первой части сказано: «Теория электрических цепей... содержит ряд допущений и предположений, которые можно... оценить, только располагая отчетливыми знаниями... электромагнитных явлений». Поэтому первые две главы посвящены обобщению понятий и законов электромагнитного поля, а также энергии и механическим проявлениям электрического и магнитного полей.

Первая часть охватывает все основные величины и явления в электромагнитном поле и в электрических цепях, выводит зависимости между ними с широким использованием высшей математики, а также векторной алгебры. В этой части излагаются сначала вопросы полей, а затем цепей, т. е. авторы отступают от порядка

дальнейшего изложения, где теория цепей предваряет теорию поля. Большое количество материала, несмотря на значительный объем этой части, заставило авторов излагать это в кратком виде. Все эти особенности первой части учебника требуют высокой подготовки учащихся по физике и математике.

Примерно те же задачи в учебнике [13] решают первые две главы I раздела «Основные понятия и соотношения для электромагнитных полей и электрических цепей», но в более простом изложении и вдвое меньшем объеме.

В учебнике [10] первая краткая глава ограничена рассмотрением только основных законов, элементов и параметров электрических цепей. Близко к ней по содержанию и объему «Введение» в учебнике [11].

После этих частей в учебниках [9, 10, 11, 13] следует изложение теории цепей. Учебники [12] и [14] сразу начинаются с теории цепей, в них раздел обзорного характера отсутствует, а необходимые основные соотношения напоминаются в ходе изложения теории цепей. Таким образом, учебники по ТОЭ весьма отличаются друг от друга уже по первой их части, начиная с большого ее объема и кончая полным ее отсутствием.

4. Теория электрических и магнитных цепей в учебниках по ТОЭ

По построению разделов, посвященных линейным электрическим цепям со сосредоточенными параметрами, учебники можно разделить на две группы. В учебниках [11, 12, 13, 14] сначала рассматриваются цепи постоянного тока и методы их расчета, а затем — процессы в цепях переменного тока и расчет этих цепей. В учебниках [9, 10] сразу изучаются цепи синусоидального тока и методы их расчета, так как цепи постоянного тока могут рассматриваться как частный случай цепей переменного тока при частоте, равной нулю.

Различна и последовательность изложения теории и методов расчета линейных и нелинейных цепей в этих двух группах учебников. В [12, 13, 14] после изложения линейных цепей постоянного тока сразу излагаются нелинейные цепи постоянного тока, а после линейных цепей переменного тока — нелинейные. В [9, 10, 11] сначала полностью излагается теория линейных цепей постоянного и переменного тока со сосредоточенными и распределенными параметрами в установившихся и переходных режимах. Только после этого излагаются нелинейные цепи, сначала постоянного тока, затем — переменного.

Магнитные цепи при постоянном магнитном потоке во всех учебниках рассматриваются после нелинейных электрических цепей постоянного тока, при переменном потоке — после нелинейных цепей переменного тока; при этом на основе подсчета потерь в сердечнике катушка и трансформатор в первом приближении заменяются

эквивалентными схемами с постоянными параметрами, для которых строятся векторные диаграммы.

Переходные процессы в линейных электрических цепях со сосредоточенными параметрами и их расчет методами: классическим, наложения, спектральными и операторным — во всех учебниках излагаются после установившихся режимом в этих цепях при переменном токе. Учебники рассматривают также переходные процессы в нелинейных цепях после установившихся режимов в этих цепях при переменном токе.

Цепи с распределенными параметрами рассматриваются во всех учебниках в двух режимах — установившемся при синусоидальном напряжении (в [13] также при постоянном напряжении) и при переходных процессах. Различно лишь расположение этих двух тем. В [9, 11, 12] они следуют друг за другом, причем в [11] рассматриваются до нелинейных цепей, в [9, 12] они являются последним разделом теории электрических цепей. В [13] установившиеся режимы излагаются после рассмотрения цепей со сосредоточенными параметрами соответственно при постоянном и синусоидальном напряжениях, переходные — после переходных процессов в линейных цепях со сосредоточенными параметрами, установившиеся процессы в [10, 14] соответственно до и после цепей трехфазного тока, переходные — в [10] после классического, а в [14] — после спектрального методов.

Из изложенного видно, что учебники ТОЭ рассматривают весь материал по электрическим и магнитным цепям в разной последовательности. При этом подход к расположению отдельных тем в некоторых учебниках одинаков, но состав «согласных» групп по разным темам — разный.

5. Теория электромагнитного поля в учебниках по ТОЭ

Из пяти рассматриваемых учебников ТОЭ, содержащих эту часть курса, три — [10, 12, 13] — построены по одинаковому плану, четвертый — [9] — за одним исключением — тоже. Теория электромагнитного поля в первых трех учебниках начинается с главы об электростатическом поле, затем следует глава об электрическом поле постоянного тока в проводящей среде, потом — глава о магнитостатическом поле постоянного тока.

Учебник [9] на базе своей первой части начинает теорию поля с главы «Уравнения электромагнитного поля», в которой на основе интегральной формы обосновывается полная система уравнений Максвелла в дифференциальной форме. Затем в той же последовательности, как и в [10, 12, 13], следуют главы об электростатическом, электрическом и магнитостатическом полях. Важные вопросы расчета электрических параметров основных элементов всех электротехнических устройств и цепей — емкостей и индуктивностей — в [10, 12, 13] рассматриваются в главах, посвященных расчету соот-

ветствующих постоянных полей разных устройств, в [9] они выделены в отдельные главы: «Расчет электрической емкости» после первой, «Расчет индуктивностей» — после третьей главы. Затем в учебниках [10, 12, 13] следует глава, посвященная полной системе уравнений электромагнитного поля, в общем виде и в комплексной форме, и теореме Умова — Пойнтинга.

Далее на основе теперь уже одинакового материала в этих четырех учебниках излагается теория переменного электромагнитного поля с некоторой разницей в порядке размещения аналогичного материала.

В учебнике [9] сначала излагаются теория этого поля в диэлектриках, в основном плоская волна, излучение волн, сведения о волноводах, затем электромагнитное поле в проводящей среде, плоская затухающая волна, поверхностный эффект и экранирование.

В учебнике [10] сначала рассматривается излучение, затем плоская волна в диэлектрической и проводящей средах, поверхностный эффект и в заключение волноводы и объемные резонаторы.

В учебнике [12] — сначала электромагнитное поле, плоская волна, поверхностный эффект в проводящей среде, затем распространение электромагнитных волн в диэлектрической и полупроводниковой средах, излучение электромагнитной энергии и в заключение — также волноводы.

В учебнике [13] — сначала плоские волны в диэлектрической и проводящей средах, поверхностный эффект и в конце — основы теории волноводов и объемных резонаторов.

В III томе учебника [11] 1969 г. порядок изложения и содержание теории электромагнитного поля весьма отличается от рассмотренных выше учебников. После вводной главы следует глава об уравнениях Максвелла в дифференциальной форме с вытекающими из них приложениями — вплоть до резонаторов и волноводов, электрических генераторов, включая магнитогидродинамические, и движения заряженных частиц. В третьей главе рассматриваются постоянные и переменные поля в диэлектриках и ферромагнетиках, в четвертой — потенциальные поля всех видов и методы их расчета, а также переходные процессы в полях, в пятой — весьма подробно энергия и силы в полях, а также использование их в электрических машинах, что частично было рассмотрено во второй главе. Шестая глава посвящена электромагнитному полю в проводящей среде и поверхностному эффекту с практическими приложениями, седьмая — электромагнитным волнам, восьмая — излучению. Эта часть ТОЭ содержит много вопросов, не входящих в программу курса; объем этой части весьма велик.

Из изложенного видно, что в этой книге нарушен основной принцип учебников — «от простого к сложному». Вместе с тем такое изложение теории поля представляет большой интерес, оно содержит к тому же большое число важных примеров, но это монография, по поводу которой можно повторить приведенные выше рекомендации ее автора, как редактора, по поводу книги К. Шимони: «она окажется полезным пособием для студентов, инженеров, аспи-

рантов и преподавателей, стремящихся углубить свои знания в области ТОЭ», но прибавим — не как учебник для студентов, впервые изучающих курс ТОЭ.

6. Объем курса и новые вопросы в программе и учебнике по ТОЭ

Очевидно, что на содержании курса ТОЭ отражается его объем, т. е. число часов, отводимое ему в учебном плане. Эта величина в различных электротехнических вузах и факультетах колеблется между 220 и 380 часами, т. е. разница может быть до 160 часов. Вместе с тем в программу курса ТОЭ 1971 г. включен ряд новых вопросов и расширены некоторые вопросы по сравнению с предыдущей программой, например, расчет электрических цепей методами матриц и сигнальных графов, добавления к теории четырехполюсников, метод сеток и моделирование статических полей, понятие о магнитогидродинамике. Поэтому целесообразно использовать предусмотренную программой 1971 г. возможность краткого изложения преподавателями новых вопросов ТОЭ, в том числе разработанных ими самими. Это резко повышает авторитет преподавателя, интерес к курсу и является характерным для вузов высокого уровня.

Очевидно, что официальное и неофициальное расширение курса вносит затруднения в изложение и без того перегруженной программы: некоторые разделы приходится сокращать. В первую очередь это касается разделов, которые входят в другие курсы, например, в курс технической электроники. Следует настойчиво рекомендовать при уточнении содержания отдельных частей и тем курса ТОЭ согласовывать их со смежными дисциплинами, предыдущими и последующими: физикой, электрометрией, технической электротехникой, электрическими машинами, техникой высокого напряжения и т. д. Помимо содержания, необходимо согласовать терминологию, обозначения, а в случае одновременного чтения курсов приходится иногда изменять порядок изложения.

7. Предлагаемое построение курса и учебника по ТОЭ

Далее рассматривается представляющееся наиболее целесообразным построение курса и учебника по ТОЭ с учетом всего предыдущего материала, в том числе психолого-педагогической базы преподавания, реализованное автором с его соавторами в учебнике [3]. При этом в основу положено требование рационального и экономного построения, особенно из-за характерной для настоящего времени перегрузки учебных планов электротехнических вузов и факультетов.

Из анализа содержания и построения основных учебников по ТОЭ, приведенного в пп. 1—6 этой главы, видно, что основной порядок изложения материала — сначала теория электрических и магнитных цепей, а затем теория электромагнитного поля — является наиболее целесообразным. Спорной является лишь необходимость вводной части курса, ее объем и содержание, а также порядок изложения материала по теории цепей и теории поля.

а. О вводной части курса и учебника

Хотя курс ТОЭ читается всюду после раздела «Электричество и магнетизм» курса физики, передать этот раздел в курс ТОЭ кафедра физики не может, так как при современном развитии физики почти все ее разделы связаны с электромагнитными процессами. Это обстоятельство и необходимость в экономии времени являются причинами возражений против вводной части курса ТОЭ, посвященной основам электромагнетизма.

Сторонники варианта ТОЭ, начинающегося сразу с теории цепей, указывают также, что при этом можно раньше начать специальные курсы; представляется, однако, что общими курсами не следует жертвовать в пользу специальных курсов.

О необходимости вводной части говорит ряд важных соображений. В ней заинтересованы специальные дисциплины, изучение которых начинается тогда, когда полный курс ТОЭ еще не закончен, например, курс электротехники. Этот курс представляет собой своеобразную энциклопедию электротехники, как по принципам, положенным в основу измерительной аппаратуры, так и по объектам измерений. Чтобы успешно изучать этот курс, надо иметь четкие представления в области физических основ электротехники в инженерном аспекте. Например, теория приборов базируется на том, что момент их вращения равен производной энергии поля по углу отклонения, а студент из курса физики и теории цепей этого не знает.

Вторым весьма важным доводом в пользу вводной части является необходимость в методологической целостности курса ТОЭ. Студент должен получить все сведения по обоснованию положений данного курса, не обращаясь к другим источникам, где они могут быть изложены с других позиций. Введенные лишь по ходу изложения в новой форме старые соотношения могут сбить с толку учащихся, поэтому необходим обзор этих соотношений, но построенный оптимально с точки зрения интересов дальнейшего изложения.

Кроме того, учитывая фундаментальный характер курса ТОЭ для всей системы образования инженера-электрика, можно утверждать, что даже некоторая доля повторения сыграет положительную роль, тем более, если эти повторения будут делаться с другой — инженерной — точки зрения.

Вместе с тем из-за перегрузки учебных планов надо учесть многочисленные требования учебной администрации об исключении части курса ТОЭ, якобы повторяющей часть предыдущего курса, а также отсутствие интереса студентов к повторениям. Поэтому вводную часть необходимо построить своеобразно; даже в названии должен быть отражен иной подход к вопросам, частично перекликающимся с курсом физики.

Курс ТОЭ, как и всякий другой курс, должен начинаться с «Введения». Студенты обычно относятся к нему с большим интересом, так как узнают содержание и значение нового для них курса. Поэтому во «Введении» наряду с данными о бурном росте электрификаций СССР и комплекса ее проблем: электромашиностроения, электроизмерительной техники, передачи электроэнергии, электроавтоматики и т. д. — и значении теоретических основ для практической электротехники целесообразно напомнить об основных величинах, характеризующих любую электрическую систему, и их обозначениях и единицах измерения в СИ. Сначала следует сказать о величинах, характеризующих электромагнитное поле в каждой точке: напряженностях его электрической и магнитной составляющих, проницаемостях сред и т. д., затем об интегральных величинах: напряжении, токе, магнитном потоке, сопротивлении и т. д., характеризующих электрические и магнитные цепи, и о разделении курса ТОЭ на две основные части: теорию цепей и теорию полей.

Затем в первую часть учебника целесообразно включить материал, необходимый для четкого понимания теории электрических и магнитных цепей. Когда преподаватель, например, впервые чертит на доске цепь, питаемую источником электрической энергии и состоящую из последовательного соединения сопротивления, индуктивности и емкости, для него каждый элемент этой цепи «физически» ясен, студент же воспринимает их, как правило, формально.

Поэтому в первой части курса (после «Введения») целесообразно изучать параметры электрических и магнитных цепей и энергетические процессы в них, в частности, принципы действия источников и приемников электрической энергии, осуществляющих прямое или обратное преобразование механической энергии в электрическую.

Тогда в первой главе должны быть рассмотрены параметры цепей — емкость, сопротивление, индуктивность, взаимная индуктивность, а также взаимная емкость, т. е. понятие, дуальное взаимной индуктивности: его введение весьма упростит далее изложение принципа действия машин с электрическим полем. При этом напоминаются общие формулы, определяющие величины этих параметров, и на основе этих зависимостей выводятся выражения для важных случаев, например, емкости, сопротивления изоляции и индуктивности двухпроводной линии, а также взаимной емкости и взаимной индуктивности двух параллельных двухпроводных линий. Очевидно, что при этих новых интересных для студентов и важных для практики расчетов будет осуществлено необходимое повторение

основных зависимостей, известных из курса физики, не в формальном, а в творческом плане; кроме того, целесообразно подчеркнуть дуальность емкостных и индуктивных систем, важную для следующей главы. После каждого вида линейного параметра следует рассмотреть случаи, когда параметры цепей нелинейны, т. е. зависят от тока или напряжения.

Вторая глава первой части должна быть посвящена энергии электрического и магнитного полей и ее прямому и обратному преобразованию в другой вид энергии. Разделы по обоим видам энергии надо построить аналогично, чтобы и здесь подчеркнуть дуальность этих полей и вместе с тем их различие.

Сначала рассматривается энергия линейной, потом нелинейной системы заряженных тел и соответственно контуров с токами, распределение энергий в их полях. Затем излагается наиболее важное в электротехнике — превращение электрической энергии в механическую на примере электроизмерительных приборов, а также принцип работы электрических машин в генераторном и двигательном режимах и движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях.

Важным свойством первой части должна быть доступность и относительная несложность изложения материала. Этот принцип не всегда выдерживается в учебниках ТОЭ. Так, например, вводная (первая) часть в [9], написанная на высоком уровне, сложнее следующей части.

Материал, изложенный в двух первых главах, позволит учащимся вспомнить основные соотношения теории электромагнитных явлений курса физики, а также прочувствовать физические основы работы источников и приемников в теории электрических и магнитных цепей, изучаемой после вводной части. Рассмотрение преобразования электрической энергии в механическую в измерительных приборах покажет использование теории для целей практики, что всегда интересует студентов (в особенности при изучении теоретических курсов!). Оно обеспечит также сознательное отношение к применению приборов при работах в лаборатории, особенно учитывая то, что курс электротехники изучается после изучения цепей в курсе ТОЭ и после лаборатории по ним. Рассмотрение же движения заряженных частиц приведет к пониманию основных принципов работы электронных осциллографов и других приборов, также применяемых в лаборатории ТОЭ.

6. О порядке изложения теории цепей постоянного и переменного токов

В некоторых учебниках после вводной части сразу излагается теория цепей переменного тока, а в других — сначала цепей постоянного тока. Какой же вариант является оптимальным?

Основной задачей теории линейных цепей постоянного тока является изучение многочисленных методов расчета сложных схем.

Восприятие и усвоение некоторых из них: методов взаимности, эквивалентного источника, контурных токов и в особенности узловых напряжений, является трудной задачей для учащегося.

При переходе к линейным цепям синусоидального тока, прежде чем будет доказана возможность формального применения тех же методов расчета цепей при условии символической записи величин, учащимся надо «прочувствовать» сам переменный ток, особенности протекающих при нем процессов, в частности энергетических, «поведение» новых элементов цепей: индуктивности и емкости, замену их реактивными сопротивлениями, зависящими от частоты, изображение синусоид векторами, действия над которыми носят геометрический характер, символическую запись векторов и сопротивлений и алгебраический характер операций над ними и т. д.

Совершенно ясно, что восприятие и освоение столь обширного и необычного материала является крайне трудным и объединение его с изучением методов расчета цепей нецелесообразно: здесь для студента, недавно начавшего изучать этот курс, сразу нарушаются все четыре основные правила обучения (см. п. 2, гл. I). При этом использование того, что цепи постоянного тока являются частным случаем цепей переменного тока, не даст экономии времени, наоборот, оно будет перерасходовано из-за необходимости одновременного освоения громадного объема трудного материала.

Из изложенного ясна методическая целесообразность разделения всего основного материала теории цепей на две части: цепи постоянного тока и цепи переменного тока. Но при этом нецелесообразно доводить этот принцип до самого конца теории цепей, как это, например, сделано в учебниках [13, 14], где достаточно сложная и по сути абстрактная теория четырехполюсников в основном излагается в разделе цепей постоянного тока после сравнительно простого предыдущего материала. Позже эта теория распространяется на случай переменного тока в весьма краткой форме. Аналогично положение с теорией цепей с распределенными параметрами в учебнике [13], которая впервые изучается в разделе цепей постоянного тока. Тем самым в этих двух случаях также нарушаются правила обучения. Между тем к изучению четырехполюсников и линий с распределенными параметрами, к тому же представляющих наибольший интерес для техники переменного тока, в разделе цепей переменного тока студенты уже хорошо подготовлены и их не затруднит также переход к частному случаю постоянного тока.

в. О порядке изучения линейных и нелинейных цепей

По этому вопросу необходимо также выбрать оптимальный вариант из двух изложенных выше (см. п. 4 этой главы): в первом — после теории линейных цепей каждого вида излагается случай их нелинейности, во втором — сначала полностью теория линейных цепей всех видов, затем — нелинейных.

Сторонники варианта выделения теории всех нелинейных цепей в отдельную часть аргументируют это тем, что сейчас на основе нелинейных цепей создается и бурно развивается обширная и важная техника. Однако курс ТОЭ отнюдь не является практическим руководством или справочником по отдельным направлениям техники, а только их теоретической базой. Краткое описание и принципиальные схемы некоторых устройств, например магнитных усилителей, умножителей частоты и т. д., включаемые в учебник ТОЭ, совершенно недостаточны для их исчерпывающего изучения — оно дается в специальных курсах. Поэтому приведенный выше аргумент нельзя считать обоснованным. С другой стороны, изучение сначала всех видов и режимов линейных цепей, начиная с цепей постоянного тока и кончая переходными процессами в цепях переменного тока с распределенными параметрами, с тем чтобы после этого вернуться к вопросу нелинейных цепей постоянного тока, который весьма просто изложить после линейных цепей постоянного тока, аналогично для цепей переменного тока и т. д., говорит также против рассматриваемого варианта. Кроме того, одним из приемов анализа нелинейных цепей является их частичная линеаризация, использование эквивалентных синусоид и т. п., изложение чего упрощается, если соответствующий нелинейный раздел будет следовать сразу за линейным.

Исходя из изложенного видно, что с методической точки зрения целесообразно материал по нелинейным цепям разделить на три части, излагая теорию нелинейных цепей постоянного тока вслед за линейными также постоянного тока, нелинейные цепи при периодическом переменном токе вслед за линейными этого рода тока, переходные процессы в нелинейных цепях со сосредоточенными параметрами — после этих процессов в линейных цепях. Процессы в нелинейных цепях с распределенными параметрами не входят в программу курса ТОЭ, но если в будущем они будут туда включены, их нужно будет рассматривать после линейных цепей при установившихся и аналогично при переходных процессах.

г. Об изучении переходных процессов в электрических цепях со сосредоточенными параметрами

Здесь следует присоединиться к единодушному мнению авторов учебников ТОЭ об изложении этого раздела после установившихся режимов в цепях переменного тока. Но при этом целесообразно после рассмотрения переходных процессов классическим методом изложить наиболее понятные на этой основе переходные процессы в нелинейных цепях. Весь этот материал дает «физическую» основу переходным процессам, что облегчит усвоение излагаемых далее математических методов: наложения (в том числе импульсного интеграла Дюамеля), спектрального и операционного.

д. О месте теории электрических цепей с распределенными параметрами в установившихся и переходных режимах

Как видно из п. 4 этой главы, здесь также имеются два основных варианта изложения этого материала: 1) оба режима — сначала установившийся, затем переходный — рассматриваются друг за другом после всей теории цепей со сосредоточенными параметрами и 2) установившийся и переходный режимы рассматриваются соответственно после этих режимов в цепях со сосредоточенными параметрами. Своеобразие уравнений для цепей с распределенными параметрами, т. е. уравнений в частных производных в зависимости от времени и расстояния до исследуемой точки цепи, отличающихся от обыкновенных дифференциальных уравнений с одной независимой переменной временем, с которыми студентам приходится иметь дело при изучении цепей со сосредоточенными параметрами, говорит в пользу первого варианта, т. е. последовательного рассмотрения установившихся и переходных режимов в цепях с распределенными параметрами в конце теории цепей до теории электромагнитного поля. В пользу этого варианта говорит также возможность изложения физической сущности процессов в этих цепях так, что она будет преддверием к сути явлений в электромагнитном поле. Опыт также показал, что и здесь целесообразно рассмотрение установившегося процесса сначала для цепи с распределенными параметрами при постоянном токе, а потом получение из них аналогичных зависимостей для случая синусоидального тока; после этого изучаются переходные процессы в этих цепях.

е. О содержании и изложении теории электромагнитного поля

Теория электромагнитного поля — наиболее сложная часть курса ТОЭ как по своему содержанию, так и по математическому аппарату — векторному анализу. Вместе с тем в этой части необходимо дать более широкое представление о процессах в поле по сравнению с обычно излагаемыми, так как этого требует современная техника. Поэтому важным является рационализация изложения материала и его изучение по принципу «от простого к сложному». Учитывая сказанное в п. 5 этой главы, следует согласиться с принятой большинством авторов учебников последовательностью изложения материала: статические поля — система уравнений Максвелла — переменные поля.

После введения, посвященного природе электромагнитного поля и необходимости его изучения для электротехники, целесообразно рассмотреть по очереди все три вида статических полей: электрическое в диэлектрической среде, то же в проводящей среде и магнитное поле. Известные соотношения, характеризующие эти

поля, преобразуются в векторную форму, их соотношения приводятся к уравнениям Пуассона, Лапласа и двум уравнениям Максвелла и устанавливаются аналогии и различия для отдельных видов полей. Эти аналогии позволяют в ряде важных случаев рассчитывать различные поля аналогичным образом, что целесообразно показать далее на примерах применения уравнения Лапласа (включая метод разделения переменных), уравнения Пуассона, а также для нелинейных сред — уравнений Максвелла. После этого целесообразно изложить метод зеркальных изображений с его использованием для всех видов полей в линейных средах.

Такой методический прием — анализ не по виду полей, а по типу уравнений — сокращает и упрощает изложение по сравнению с полным изложением теории и расчетов каждого вида полей раздельно. Важно также рассмотреть моделирование полей методами проводящего листа и электролитической ванны.

После статических полей большинство авторов учебников переходят сразу к общему случаю — переменному электромагнитному полю и приводят для него полную систему уравнений Максвелла. Учащимся приходится преодолеть большие трудности из-за необходимости охватить сразу обширный материал. Кроме того, такой подход способствует созданию ложного представления о том, что основные задачи электротехники, например преобразование и передача энергии, могут быть решены только на основе переменного электромагнитного поля.

Поэтому с точки зрения принципа «от простого к сложному» целесообразно предварительно рассмотреть постоянное электромагнитное поле. Положение Максвелла о том, что объемная плотность энергии электромагнитного поля равна сумме плотностей энергий электрического и магнитного полей, не дает указаний относительно движения энергии, а выражение для этого движения через векторы \mathbf{E} и \mathbf{H} было получено Пойнтингом для переменного поля. Поэтому следует вектор Пойнтинга ввести для постоянного поля, что можно сделать, например, для передачи энергии от генератора к приемнику по коаксиальному кабелю. Отсюда учащиеся увидят, что, зная распределение векторов \mathbf{E} и \mathbf{H} в пространстве, можно определить движущуюся энергию в каждой точке и рассчитать передаваемую и теряемую при передаче мощность в любом электротехническом устройстве. Это еще раз подчеркнет важность расчета составляющих электромагнитного поля — электрического и магнитного полей. Необходимо также отметить, что простое наложение постоянных полей — электрического и магнитного, — создаваемых различными источниками, не образует электромагнитного поля.

Только теперь целесообразно перейти к общему случаю — теории переменного электромагнитного поля, — выведя систему уравнений Максвелла в дифференциальной форме, доказав теорему Умова — Пойнтинга, приведя уравнения для электродинамических потенциалов, и в заключение — систему уравнений электромагнитного поля в символической форме.

Далее должно быть изучено волновое движение электромагнитного поля. При этом в ряде учебников сначала рассматриваются электромагнитные волны в разных средах, затем излучение. Более целесообразна обратная последовательность, так как излучение является причиной волн, а волны в проводящей среде причиной поверхностного эффекта, которому должна быть посвящена следующая тема. Чтобы приблизить теорию к практике, целесообразно далее рассмотреть электромагнитное экранирование на примерах защиты от внешнего поля.

Новым для курса ТОЭ является вопрос о переходных процессах в электромагнитном поле. Его необходимо рассмотреть не только из-за «симметрии» с теорией цепей, но и из-за важности для практики — сначала в общем виде, а затем для частных случаев, например, для установления постоянного магнитного потока в пластине и тока в проводе.

Последнее десятилетие характеризуется широким фронтом исследовательских работ во всех развитых странах по магнитогидродинамике и ее приложениям к технике. Поэтому необходимо отразить это направление в курсе несколько шире, чем предусмотрено программой ТОЭ 1971 г.: «Понятие о магнитогидродинамике». Тогда логическим завершением последней части курса, до сих пор посвященной только электромагнитному полю в неподвижных средах, будут начала теории поля в движущихся средах, в том числе и плазме. На этой основе должны быть рассмотрены основные уравнения магнитогидродинамики и принципы устройства магнитогидродинамических генераторов и двигателей.

Таким образом, выше обосновано разделение курса ТОЭ на «Введение» и четыре части: 1) параметры электрических цепей и энергетические процессы в них; 2) теория электрических и магнитных цепей при постоянном токе; 3) теория цепей переменного тока и 4) теория электромагнитного поля. В следующих главах приведены частные методики построения и преподавания этих частей: изложение материала на лекциях, проведение практических, лабораторных и домашних занятий, а также факультативной работы.

**ЧАСТНАЯ МЕТОДИКА ПРЕПОДАВАНИЯ
ВВЕДЕНИЯ, ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
И МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В НИХ**

1. Введение

Во «Введении», излагаемом на вводной лекции, дается представление о роли электротехники, в особенности в нашей стране, и о значении и содержании ее теоретических основ. Указывается, что основными задачами электротехнических устройств являются преобразование в электрическую энергию других видов энергии, передача ее на расстояние и обратное преобразование в нужный вид энергии. Подчеркивается, что во всех этих процессах основную роль играет электромагнитное поле, составляющими которого являются поля электрическое и магнитное. Наиболее наглядно это рассмотреть на примере линии передачи постоянного тока. При этом напоминаются основные величины — векторы, характеризующие процесс: напряженность \mathbf{E} и смещение \mathbf{D} электрического поля, плотность тока \mathbf{j} , магнитная индукция \mathbf{B} и напряженность \mathbf{H} магнитного поля, а также характеристики сред — диэлектрическая ϵ и магнитная μ проницаемости и удельная проводимость γ .

Дается краткая история ТОЭ. Затем указывается на возможность выделения целой области задач, решаемых методами теории цепей, используя интегральные величины: напряжение $U = \int \mathbf{E} d\mathbf{l}$, заряд $Q = \int \mathbf{D} d\mathbf{S}$, ток $I = \int \mathbf{j} d\mathbf{S}$, магнитный поток $\Phi = \int \mathbf{B} d\mathbf{S}$, намагничивающую силу $F = \int \mathbf{H} dl$ (здесь l — длина, S — площадь), а взамен характеристик среды ϵ , μ , γ — интегральные характеристики носителей полей: электрического — емкость $C = \frac{Q}{U}$, магнитного — индуктивность $L = \frac{\Psi}{I}$, где Ψ — потоко-сцепление, и преобразователя энергии поля в тепловую энергию — сопротивление $R = \frac{U}{I}$. Эти величины называют *параметрами цепей*. Если параметры не зависят от токов или напряжений, уравнения и цепи будут *линейными*, если зависят, то *нелинейными*.

В заключение «Введения» кратко рассказывается о построении курса ТОЭ, о принятой в нем системе единиц СИ и рациональной форме написания уравнений.

2. Параметры электрических и магнитных цепей

Дальнейшее изложение посвящается параметрам электрических и магнитных цепей — C , R и L . Помимо важных для практики результатов оно должно напомнить ряд основных соотношений из курса физики.

Надо указать на два вида электрических цепей: со *сосредоточенными параметрами* и *распределенными параметрами* (пример последних — рассмотренная во «Введении» линия передачи), причем при постоянном токе надо учитывать только сопротивление, при переменном — также индуктивность и емкость. Затем дается определение магнитной цепи и ее параметра — магнитного сопротивления R_m .

Следующий раздел посвящен емкости и ее расчету. Напоминается обобщенная теорема Гаусса ($\oint DdS=Q$) и понятие потенциала (ϕ), а также потенциальный характер электрического поля, так как $\oint Edl=0$. Затем вычисляются емкости ряда важных для электротехники устройств: коаксиального кабеля и двухпроводной линии, дается понятие взаимоемкости на примере электрического поля, создаваемого двумя парами заряженных тел — конденсаторов; тогда их взаимоемкость равна отношению заряда накоротко замкнутого одного из конденсаторов к напряжению другого. Вычисляется взаимоемкость двух параллельных двухпроводных линий, расположенных симметрично одна над другой. Затем рассматриваются линейные и нелинейные диэлектрики и конденсаторы и на основе вида характеристик $D(E)$ и $Q(U)$ вводятся понятия статической, дифференциальной и динамической проницаемости, емкости и взаимоемкости и подсчитывается емкость плоского конденсатора при заданной зависимости смещения от напряженности.

Аналогично рассматривается сопротивление (и проводимость), показывается потенциальность электрического поля в проводящей среде, принцип непрерывности тока и в качестве примера рассчитывается сопротивление заземления. Показывается аналогия электрических полей в диэлектрической и проводящей средах, которая используется для определения проводимости изоляции коаксиального кабеля и двухпроводной линии, исходя из выражений для их емкости. Затем рассматриваются вольт-амперные характеристики линейных и нелинейных резисторов и их статическое, дифференциальное и динамическое сопротивление.

При рассмотрении индуктивности напоминает принцип непрерывности магнитного потока, понятие потокосцепления, выражение для индуктивности уединенного контура, законы полного тока ($\oint HdI=I$) и электромагнитной индукции ($e = -\frac{d\Psi}{dt}$).

Затем на основе закона полного тока рассчитываются индуктивности тороида, соленоида и двухпроводной линии, вводится понятие взаимоиндуктивности, которая вычисляется для двух параллельных двухпроводных линий. Рассмотрение линейных и нелиней-

ных материалов, индуктивностей и взаимоиндуктивностей ведется на основе характеристик $B(H)$ и $\Psi(I)$ аналогично предыдущему с введением статической, дифференциальной и динамической магнитной проницаемости, индуктивности и взаимоиндуктивности. Далее на основе заданной математической зависимости $B(H)$ подсчитываются указанные индуктивности нелинейного тороида.

Таким образом, в этой главе напоминаются основные соотношения из курса физики, но они используются для получения данных, важных для электротехнической практики.

3. Энергия в электрических цепях и ее прямое и обратное преобразования в механическую энергию

Сначала определяется энергия электрического поля системы заряженных проводящих тел в общем виде, а отсюда — для уединенного тела, линейного конденсатора и преобразователя емкостной машины — двух линейных конденсаторов C_1 и C_2 , связанных взаимемкостью C_{12} :

$$W = \frac{C_1 U_1^2}{2} + \frac{C_2 U_2^2}{2} + C_{12} U_1 U_2.$$

Для нелинейного конденсатора по его кулон-вольтной характеристике определяется работа, затраченная на зарядку конденсатора. Следует обратить внимание, что энергия нелинейного конденсатора, в отличие от линейного, не определяется только конечными значениями заряда и напряжения, а зависит от вида кулон-вольтной характеристики. Здесь же определяются потери на диэлектрический гистерезис.

После этого рассматривается распределение энергии в электрическом поле и показывается, что плотность энергии в линейной и нелинейной средах соответственно равны:

$$W_0 = \frac{1}{2} ED \quad \text{и} \quad W_0 = \frac{1}{2} ED.$$

Затем исследуются взаимные преобразования энергий электрического поля и механической в системе заряженных тел и даются выражения для обобщенной силы F , как производной энергии по обобщенной координате X :

$$F = - \left(\frac{\partial W}{\partial X} \right)_{Q = \text{const}} = + \left(\frac{\partial W}{\partial X} \right)_{\varphi = \text{const}}.$$

На основе приведенных выше соотношений дается теория электростатического вольтметра и емкостной машины постоянного тока в режимах генератора и двигателя.

Затем рассматривается движение заряженной частицы в однородном электрическом поле с начальной скоростью, совпадающей по направлению с вектором E , а также перпендикулярной ему.

Энергия магнитного поля системы контуров с токами рассматривается аналогично предыдущему: сначала в общем виде, затем для уединенного контура и двух контуров с линейными индуктивностями L_1 и L_2 , связанных взаимной индуктивностью M , т. е. преобразе индуктивной машины:

$$W = \frac{L_1 I_1^2}{2} + \frac{L_2 I_2^2}{2} + M I_1 I_2.$$

Для нелинейного тороида по его вебер-амперной характеристике определяется работа, затраченная на установление в нем магнитного потока. Следует обратить внимание, что энергия нелинейного тороида, в отличие от линейного, не определяется только конечными значениями тока и потокосцепления, а зависит от вида вебер-амперной характеристики. Тут же определяются потери на гистерезис.

После этого рассматривается вопрос о распределении энергии в магнитном поле и показывается, что плотности энергии в линейной и нелинейной средах соответственно равны:

$$W_0 = \frac{1}{2} H B \quad \text{и} \quad W_0 = \frac{1}{2} H B.$$

Затем исследуются взаимные преобразования энергий магнитного поля и механической, вычисляются аналогичные предыдущему выражения для обобщенной силы:

$$F = - \left(\frac{\partial W}{\partial X} \right)_{\Psi = \text{const}} = + \left(\frac{\partial W}{\partial X} \right)_{I = \text{const}}$$

и на этой основе дается теория приборов электромагнитной и электродинамической систем и индуктивной машины постоянного тока в генераторном и двигательном режимах. Подчеркивается основная разница между индуктивной и емкостной машинами: необходимость в потокопроводе только в первой из них. Определяется сила, действующая на проводник с током в магнитном поле и на этой основе — теория приборов магнитоэлектрической системы. Как это было обосновано в п. 7а, гл. VII, такое изучение основ теории электрических машин и измерительных приборов, помимо приложения теории к практике, обеспечивает сознательную работу в лаборатории ТОЭ.

И в заключение первой части курса ТОЭ рассматривается движение заряженной частицы в магнитном поле, кардинально отличающееся от ее движения в электрическом поле.

4. Проведение различных видов занятий

На лекциях важно проводить демонстрации, показывающие характеристики: кулон-вольтную — линейного и нелинейного конденсаторов, вольт-амперную — линейного и нелинейного резис-

торов, вебер-амперную — линейной и нелинейной катушек индуктивности. Для этого применяется электронный осциллограф, который также используется для показа воздействия на движение заряженных частиц электрического и магнитного поля.

Практические занятия целесообразно посвятить решению задач по расчету простых полей, а отсюда емкости, сопротивления и индуктивности устройств простой конфигурации.

В лаборатории весьма полезно будет выполнить работы по определению емкости и индуктивности линейных и нелинейных объектов с помощью баллистического гальванометра, а также определить методом взвешивания силы взаимодействия в зависимости от расстояния между двумя соосными круговыми катушками, обтекаемыми током, а отсюда — взаимоиנדуктивности.

Домашнее задание целесообразно дать по расчету сопротивления, емкости и индуктивности двухпроводных линий — энергетической и связной, — расположенных симметрично одна над другой, и их взаимоемкости и взаимоиנדуктивности, используя соотношения, изложенные на лекции и в учебнике.

**ЧАСТНАЯ МЕТОДИКА
ПРЕПОДАВАНИЯ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
И МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ ПРИ ПОСТОЯННОМ ТОКЕ**

1. Линейные электрические цепи

Вторая часть курса ТОЭ начинается с линейных цепей постоянного тока. Напоминаются законы Ома, Джоуля — Ленца и Кирхгофа. Особое внимание надо уделить вопросу положительного направления тока, причем в соответствии с законом Ома ($U=RI$) с ним совпадает направление напряжения на том же сопротивлении. Следует упомянуть о двух типах задач теории цепей — анализе и синтезе.

Следующий вопрос — виды источников энергии. Генератор напряжения может быть представлен последовательным соединением источника постоянной э. д. с. \mathcal{E} и внутреннего сопротивления $R_{\text{в}}$, генератор тока — параллельным соединением источника постоянного тока I и внутренней проводимости $G_{\text{в}}$. Тогда соответственно их выходные напряжение U и ток I равны:

$$U = \mathcal{E} - R_{\text{в}}I, \quad I = J - G_{\text{в}}U.$$

В отличие от учебников, в которых эти простейшие схемы источников электрической энергии рассматриваются только как эквивалентные схемы любых реальных источников, целесообразно на основе гл. VIII подчеркнуть, что физически некоторые из них, например индуктивный генератор, являются источниками напряжения, а другие, например емкостный генератор, — источниками тока. Вместе с тем надо показать, что формально эквивалентная схема одного вида может быть заменена эквивалентной схемой другого вида, что используется при расчете цепей.

Далее целесообразно дать учащимся возможность «прочувствовать» процессы в цепи на примере линии передачи при переменной нагрузке — от холостого хода до короткого замыкания через режим максимальной мощности, когда к. п. д. равен 50%, и использовать теорию для практики, выведя значение необходимого сечения проводов линии и показав его прямую пропорциональность длине и полезной мощности передачи и обратную — квадрату напряжения.

2. Методы расчета линейных электрических цепей

Порядок обзора этих методов, построенный по принципам «от простого к сложному» и от «конкретного к отвлеченному» дол-

жен быть таким: метод преобразования и пропорционального пересчета, расчет по законам Кирхгофа и методы наложения, взаимности, эквивалентного источника энергии, контурных токов и узловых напряжений. Такой порядок позволит использовать предыдущие методы для вывода последующих.

При изложении метода преобразования, заменяющего цепь более простой, ей эквивалентной, можно рекомендовать дать вывод прямого и обратного преобразования соединения треугольника в звезду, чтобы использовать его также в цепях переменного тока.

Затем излагается метод пропорционального пересчета, основанный на сравнении напряжения всей цепи с полученным, исходя из произвольного задания тока в одной ветви.

Переходя к расчету цепей по уравнениям Кирхгофа надо показать две аналогичные формы записи законов Кирхгофа для узлов и контуров:

$$\sum I_k = 0 \text{ и } \sum U_k = 0; \quad (1)$$

$$\sum J_k = \sum G_k U_k \text{ и } \sum \mathcal{E}_k = \sum R_k I_k, \quad (2)$$

так как студенты обычно думают, что форма уравнений по обоим законам в принципе должна быть различной. На основе первой формы выводятся законы сложения проводимостей при параллельном соединении и сопротивлений при последовательном. Надо также показать число независимых уравнений по обоим законам Кирхгофа, а второй закон рекомендовать применять для элементарных контуров, что сразу обеспечивает независимость этих уравнений.

При изложении метода наложения надо доказать что наложение величин в ветвях цепи от каждой э. д. с. в отдельности применимо к токам и напряжениям и неприменимо к мощностям.

Аналогично до изложения метода взаимности надо доказать справедливость принципа взаимности для Т-образной схемы, которая эквивалентна любой пассивной сложной цепи с двумя парами зажимов.

Доказательство метода эквивалентного источника энергии для определения тока I или напряжения U пассивного двухполюсника при питании его от активного двухполюсника проще всего выполнить, заменив сопротивление исследуемой ветви эквивалентной э. д. с. $\mathcal{E} = -RI = -U$. Затем применяется метод наложения в два этапа — сначала приняв в расчет все источники энергии активного двухполюсника, а потом э. д. с. \mathcal{E} , что сразу дает искомое напряжение U через ток короткого замыкания, а затем искомый ток I через напряжение холостого хода пассивного двухполюсника.

Метод контурных токов проще всего доказывается для цепи с источниками напряжения, для которой составляется система независимых уравнений по второму закону Кирхгофа для искомых

контурных токов по заданным контурным э. д. с., контурным и общим сопротивлениям. Затем по найденным контурным токам определяются токи ветвей.

Метод узловых напряжений доказывается аналогично, но для цепи с источниками тока. Составляется система независимых уравнений по первому закону Кирхгофа для искоемых узловых напряжений по заданным узловым токам, узловым и общим проводимостям. Затем по найденным узловым напряжениям определяются напряжения ветвей. Необходимо также рассмотреть этот метод применительно к двухузловой цепи для получения простых зависимостей, широко используемых в дальнейшем для трехфазных цепей при соединении звездой фаз генератора и приемника.

Надо упомянуть, что доказательства методов контурных токов и узловых напряжений справедливы для любого вида источников энергии, так как можно применить прямое или обратное преобразование источника тока в источник напряжения. Надо также подчеркнуть, что эти два метода из-за стандартного вида уравнений удобны для их составления и решения методом определителей.

По всем методам расчета цепей надо дать примеры в общем виде, интересные для практики, и по возможности для одинаковой схемы, чтобы учащиеся прочувствовали разницу в методах. Например, для методов преобразования, взаимности и эквивалентного источника энергии можно рекомендовать схему неравновесного простого моста, для расчета по уравнениям Кирхгофа ту же сложную цепь, что и для методов контурных токов и узловых напряжений, а для метода наложения — параллельное включение разных источников напряжения с общей нагрузкой.

3. Расчет нелинейных электрических цепей

Напомнив об особенности нелинейных цепей: зависимости их параметров от тока или напряжения, надо указать, что основой расчета цепей с нелинейными резисторами и источниками являются их вольт-амперные характеристики, заданные графически или аналитически. Следует начать со случая, когда эти характеристики имеют практически прямолинейные участки, в зоне которых находится их рабочий режим. Тогда можно заменить их эквивалентными линейными схемами с последовательным соединением резисторов с сопротивлением, равным их дифференциальному сопротивлению в рабочей зоне, и источников напряжения, определяемых по величине и знаку пересечением оси ординат прямолинейными участками характеристик.

При полностью нелинейных вольт-амперных характеристиках резисторов цепи для получения характеристики всей цепи наиболее прост и нагляден графический метод сложения их ординат — напряжений — при последовательном соединении и абсцисс — токов — при параллельном, что позволяет также рассчитывать цепи при смешанном соединении нелинейных резисторов.

Следует также рассмотреть метод последовательных приближений (*итерационный*) сначала для простой схемы при питании нелинейного резистора от источника с нелинейной внешней характеристикой, а затем более сложной цепи, например моста с двумя нелинейными сопротивлениями, применяя метод контурных токов. При этом контуры должны быть выбраны так, чтобы контурные токи нелинейных ветвей одновременно были их действительными токами. Надо указать, что в случае расходящегося процесса для искомой величины при итерации, сходимость можно получить для другой величины, характеризующей исследуемую цепь, например, вместо тока — для напряжения на участке цепи.

4. Расчет магнитных цепей

Эту тему целесообразно начать с простейшего случая: расчета магнитного потока Φ в тороиде при допущении равномерного распределения индукции по его сечению, введя понятие магнитного сопротивления R_m и установив аналогию с законом Ома — с н. с. F вместо э. д. с. \mathcal{E} . При этом надо подчеркнуть, что аналогия не распространяется на физическую сущность: в магнитной цепи не расходуется энергия и т. д.

Для разветвленной магнитной цепи устанавливаются также аналоги законов Кирхгофа:

$$\sum \Phi_k = 0 \quad (1)$$

и

$$\sum F_k = \sum R_{mk} \Phi_k. \quad (2)$$

Затем по аналогии с электрическими цепями целесообразно рассмотреть расчет линейных магнитных цепей, тем более что в ряде устройств они работают на прямолинейных участках основных кривых намагничивания.

Расчет нелинейных магнитных цепей следует начать с обратной задачи для неразветвленной цепи — электромагнита с участка магнитопровода из разных материалов по заданной индукции B_v в воздушном зазоре — и вести в следующем порядке:

$$B_v \rightarrow \Phi_v \rightarrow \Phi_m \rightarrow B_k \rightarrow H_k \rightarrow F_k \rightarrow \sum F_k = F.$$

Зависимости $H_k(B_k)$ находятся по кривым намагничивания. Затем по полученной н. с. F и заданному напряжению U рассчитывается обмотка электромагнита. Прямая задача расчета этой магнитной цепи — нахождение B_v по заданной F — решается графически построением и суммированием ампер-веберных характеристик участков цепи.

Используя те же методы, решаются обратная и прямая задачи для разветвленной магнитной цепи. Дается рекомендация для расчета более сложных магнитных цепей, например, с последовательно-параллельным соединением участков и с несколькими обмотками; при этом надо использовать аналогию с графическими методами расчета нелинейных цепей.

В заключение этой темы необходимо изложить расчет магнитной цепи с постоянным магнитом тороидальной формы, определяя индукцию в магните по пересечению кривой размагничивания с прямой — характеристикой воздушного зазора. Надо подчеркнуть, что индукция в зазоре всегда меньше остаточной индукции материала.

5. Проведение различных видов занятий

На лекциях важно провести демонстрации для сложной электрической цепи с использованием магнитоэлектрических приборов, на опыте проверить законы Кирхгофа, подчеркнув значение положительных направлений токов и напряжений, справедливость принципов наложения, взаимности и эквивалентного источника энергии для линейных цепей и неприменимость этих принципов для нелинейных цепей. Затем на опыте разветвленной ферромагнитной цепи показываются ее нелинейность, соотношения между потоками участков цепи, наличие потоков рассеяния и тем самым подчеркивается приближенность обычных методов расчета магнитных цепей.

Практические занятия должны состоять из расчета сложных линейных электрических цепей с заданными числовыми параметрами рассмотренными выше методами в общем виде с последующей подстановкой числовых значений. Затем необходимо хотя бы начать расчет нелинейной цепи итерационным методом и провести расчеты ферромагнитной простой цепи без воздушного зазора и ферромагнитной разветвленной цепи с воздушным зазором.

В лаборатории выполняются следующие работы:

1. Исследование линии передачи постоянного тока от холостого хода до короткого замыкания при неизменном напряжении и неизменном токе генератора.

2. Применение метода наложения для цепи с двумя источниками энергии и метода взаимности для цепи с одним источником.

3. Сравнение методов эквивалентных источников напряжения и тока с действительными соотношениями в исходной цепи.

4. Исследование сложной нелинейной магнитной цепи при наличии и отсутствии в ней воздушного зазора.

Домашнее задание по этой части курса обычно состоит из прямой или обратной задачи на расчет одноконтурной или двухконтурной ферромагнитной цепи с одной обмоткой постоянного тока. Представляет также интерес задание для линейной сложной электрической цепи, различной для каждого студента: сделать обоснованный выбор из всех известных методов расчета наиболее экономного для этой цепи, что возможно только при сознательном изучении учащимся всех излагаемых в курсе ТОЭ методов расчета электрических цепей.

Тема курсовой работы, задаваемой вместо домашних заданий по первым двум частям курса ТОЭ, рекомендована выше в п. 4 гл. VI.

**ЧАСТНАЯ МЕТОДИКА ПРЕПОДАВАНИЯ
ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ
ПРИ ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ****1. Цепи синусоидального тока**

После краткого сообщения о широком применении периодических переменных токов в технике надо сказать о мгновенных значениях напряжений, токов и мощностей, частоте, используемой в различных областях электротехники, указать на значение синусоидального закона изменения величин.

Получение синусоидальной э.д.с. достаточно рассмотреть в простейшем генераторе — прямоугольной катушке, вращающейся в однородном поле. Вряд ли здесь целесообразно говорить о более сложных генераторах с вращающейся системой возбуждения, тем более что в п. 3 гл. VIII рассматривался генератор с вращающимся якорем. Процессы в генераторе следует отразить временной диаграммой магнитного потока и э.д.с., ввести на ее основе понятия угловой частоты, максимального значения потока и э.д.с., начальной фазы и сдвига по фазе. Далее на этом примере осуществляется переход к векторной диаграмме, от алгебраических операций к геометрическим. Здесь следует ограничиться мгновенными и максимальными значениями; действующие же значения целесообразней ввести позже при изучении цепи с активным сопротивлением.

Далее надо указать, что для цепей переменного тока справедливы законы Ома, Кирхгофа и Джоуля — Ленца для мгновенных значений напряжений, токов и мощностей, если их взять для одного и того же момента времени. Вместе с тем, в отличие от пассивных цепей постоянного тока, в пассивных цепях переменного тока возникают внутренние э.д.с. индуктивности и емкости, которые также должны быть учтены при составлении уравнений по основным законам. При этом необходимо задаться условными положительными направлениями, которые, подобно цепям постоянного тока, удобно выбрать для напряжений и токов совпадающими в каждом из элементов цепи: сопротивлению, индуктивности и емкости.

Затем рассматриваются цепи с сопротивлением, индуктивностью и емкостью. Методически более целесообразно рассмотреть каждую из этих цепей в отдельности, а не сразу цепь с их последовательным соединением. При этом необходимо, задавшись, например, мгновенным значением напряжения (конечно, без начальной фазы), вычислять и строить мгновенные значения всех остальных величин: тока, мощности, энергии и т. д., а не рассматривать энергетические процессы позже и отдельно. Такой разрыв нарушает цельность

понимания и восприятия процессов в этих элементарных приемниках. Подчеркивается двойная частота мгновенной мощности p , определяется средняя мощность P цепи с сопротивлением, вводится понятие действующих значений тока и напряжения и показывается равенство нулю средней мощности индуктивности и емкости.

Хороший результат и экономию времени дает одновременное рассмотрение цепи с индуктивностью L и цепи с емкостью C . Доска вертикальной чертой делится на две части, слева рассматривается цепь с L при заданном токе, справа — цепь с C при заданном напряжении; вычисляется и строится общий график энергии, мощности, напряжения для L и тока для C . Идентичность уравнений и графиков позволяет здесь указать на дуальность этих цепей, т. е. «взаимозаменяемость» напряжения и тока, и аналогию энергетических процессов. Здесь целесообразно ввести удобное для унификации методов расчета электрических цепей аналогичное э.д.с. индуктивности понятие э.д.с. емкости, равной напряжению на емкости, но направленной ему навстречу. Также аналогично вводятся реактивные сопротивления индуктивности и емкости.

Учитывая интересы лабораторных занятий, здесь своевременно вкратце показать возможность измерений приборами электромагнитной и электродинамической систем действующих значений напряжений и токов, осциллографом с вибратором магнитоэлектрической системы — их мгновенных значений, а электродинамическим ваттметром — средней мощности.

2. Анализ и расчет простых цепей переменного тока

Сначала следует рассмотреть цепь с последовательным соединением r , L и C , задавшись мгновенным значением установившегося синусоидального тока. Излишне включение цепи на заданное напряжение и лишь после указания на малопонятный пока затухающий переходный процесс — рассмотрение установившегося процесса.

В той же последовательности, как и в схеме включения участков цепи, строится векторная диаграмма напряжений на них, подчеркивается ее топографический характер, отмечается получение треугольника напряжений, а из него — треугольника сопротивлений.

Закон Ома для этой цепи, написанный для действующих значений:

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}} = \frac{U}{z}$$

следует, введя э. д. с. индуктивности и э. д. с. емкости, сопоставить с векторной записью

$$\bar{I} = \frac{\bar{U} + \bar{\mathcal{E}}_L + \bar{\mathcal{E}}_C}{r},$$

с законом Ома для мгновенных значений

$$i = \frac{u + e_L + e_C}{r}$$

и пояснить условность реактивных сопротивлений, учитывающих действие э.д.с. индуктивности и емкости.

Затем рассматриваются изменяющиеся с двойной частотой мгновенные мощности участков и всей цепи; соответствующие графики желательнее было бы совместить с графиками тока и напряжений на участках и всей цепи, но так как рисунок получится слишком сложным, график мощностей приходится строить ниже, но с тем же масштабом времени, нанеся на него еще раз напряжение и ток цепи.

Здесь вводятся понятия активной P , реактивной Q и полной S мощностей как амплитуд синусоидальных частей мгновенных мощностей. Такое определение наиболее близко к сути энергетических процессов в этой цепи, определяемых, по существу, мгновенными значениями мощностей и тем самым их амплитудами. Такой подход методически более правильный, чем принятое в учебниках [9, 10—12, 14] бездоказательное введение понятия реактивной мощности Q , равной $UI \sin \varphi$, и понятия полной мощности S , равной UI . Затем надо указать, что среднее значение мгновенной мощности всей цепи, как и ее активной мощности, равно P , так как среднее значение реактивной мощности равно нулю. Поэтому для реактивного участка Q является действительно амплитудным значением его мгновенной мощности, которое для активного участка и всей цепи равно соответственно сумме P и S со средней мощностью P . После этого уясняется значение коэффициента мощности и строится треугольник мощностей.

Как частные случаи рассматриваются цепи с сопротивлением и индуктивностью и с сопротивлением и емкостью.

Вряд ли целесообразно выделять вопрос о резонансе напряжений в отдельную главу о резонансах. Экономней рассмотреть его тут же, как частный случай цепи с r , L и C , а также рассчитать и построить для этой цепи кривые зависимости действующих значений тока и всех напряжений, мощности и угла сдвига фаз от частоты при неизменном напряжении цепи. Иногда построение этих характеристик ведется для отношений указанных величин к их значениям при резонансе. Новые обозначения этих отношений скрывают уже знакомые величины, и студенты воспринимают их формально, поэтому в первый раз резонансные кривые должны быть построены в естественных координатах. Необходимо также рассмотреть энергетические соотношения при резонансе напряжений: обмен энергиями между индуктивностью и емкостью.

Затем по той же программе рассматривается цепь с параллельным соединением r , L и C , где основное внимание уделяется резонансу токов. Эта цепь исследуется в режиме неизменного напряжения при переменной частоте. Здесь следует обратить внимание на дуальность последовательной и параллельной цепей с r , L и C ,

позволяющую перенести результаты исследования последовательной цепи при переменной частоте и неизменном напряжении на параллельную цепь при неизменном токе или параллельной цепи при неизменном напряжении на последовательную цепь при неизменном токе.

На примере параллельной цепи рассматривается проблема повышения коэффициента мощности с помощью конденсаторов, подчеркивается его технико-экономический эффект и выполняется расчет емкости батареи конденсаторов.

Следующей темой является рассмотрение параметров — сопротивлений и проводимостей приемников; здесь нужно подчеркнуть, что, по существу, речь идет о параметрах эквивалентных схем, т. е. о сопротивлениях последовательной и проводимостях параллельной схем. При этом необходимо сопоставить треугольники сопротивлений, напряжений и мощностей для последовательной схемы и треугольники проводимостей, токов и мощностей для параллельной, обратив внимание на равенство треугольников мощностей. Далее рассматриваются переходные формулы. Подчеркивается, что при анализе поведения приемника при переменной частоте необходимо заменять его эквивалентной схемой, близкой ему по физической сущности. При этом необходимо указать, что в зависимости от области рассматриваемых частот — низких или высоких — сама эквивалентная схема и ее параметры могут быть различными. Потом рассматривается сложение параметров сопротивления при последовательном и проводимости при параллельном соединениях.

Затем следует изложить специфику метода преобразования расчета цепи переменного тока со смешанным соединением приемников, питаемой одним источником. Расчет состоит в постепенной замене сложной цепи более простой, ей эквивалентной, путем арифметического сложения активных сопротивлений и алгебраического — реактивных при последовательном и аналогично проводимостей при параллельном соединении с применением переходных формул и с последующим возвращением к исходной схеме. В качестве интересной иллюстрации применения этого метода рекомендуется рассчитать цепь с параллельным соединением индуктивности и емкости с добавочными сопротивлениями, в которой возможен, или невозможен, или будет при любой частоте резонанс токов.

Следует также изложить графоаналитический метод пропорционального пересчета, заключающийся в произвольном задании тока в какой-либо ветви, последовательном построении векторной диаграммы и сравнении полученного напряжения или тока источника с заданным.

Строго говоря, только что рассмотренную тему о параметрах и элементарных методах расчета цепей можно было бы излагать на базе символического метода. Это даст некоторую экономию времени, но плохо отразится на понимании основных положений; поэтому их следует давать в чистом виде, не вуалируя алгеброй комплексных чисел. К тому же решение однотипных задач только что

рекомендованными разными методами будет способствовать как формальному, так и «физическому» восприятию особенностей цепей переменного тока.

3. Символический метод расчета цепей

После изложения сути этого метода на основе векторной диаграммы на комплексной плоскости следует подчеркнуть, что от операций над реальными величинами, т. е. мгновенными значениями, здесь переходят к операциям над их символическими изображениями, что приводит к алгебраизации дифференциальных уравнений. Этот переход основан на взаимнооднозначном соответствии вектора на комплексной плоскости (и соответствующего комплексного числа) его проекциям на ось действительных и мнимых величин; такое же соответствие имеет место и для производных, и интегралов.

Следует дать все три формы записи комплексов, причем сначала необходимо оперировать вращающимися векторами (отмечаемыми звездочками), записываемыми с помощью *множителя вращения* $e^{j\omega t}$, ввести комплексные сопротивления и проводимости и лишь после сокращения в уравнениях Кирхгофа множителя вращения переходить к общепринятым расчетам. Необходимо обратить внимание на следующую эволюцию расчетных методов при переходе от цепей постоянного тока при отсутствии в них внутренних э.д.с. (например, термо-э.д.с.) к синусоидальному току:

Род тока	Значения	Учитываются э. д. с.	Оперируют сопротивлениями	Операции
Постоянный	Действительные	Внешние	Омическими	Алгебраические
Синусоидальный	Мгновенные	Внешние и внутренние	Активными	Алгебраические
Синусоидальный	Действующие	Внешние	Полными	Геометрические
Синусоидальный	Комплексные	Внешние	Комплексными	Алгебраические

Таким образом, символический метод позволяет вести расчеты формально так же, как и при постоянном токе, но оперируя комплексами напряжения, токов, сопротивлений и проводимостей. Здесь же указать на возможность применения всех расчетных методов, выведенных для цепей постоянного тока во второй части курса.

Так как проекция произведения двух векторов не равна произведению их проекций, для вычисления комплекса полной мощности приходится применять искусственный прием — умножение комплекса напряжения на сопряженный комплекс тока:

$$\begin{aligned} \dot{S} &= Ue^{j(\omega t + \psi_1)} Ie^{-j(\omega t + \psi_2)} = UIe^{j(\psi_1 - \psi_2)} = \\ &= UI \cos \varphi + jUI \sin \varphi = P + jQ. \end{aligned}$$

Ввиду исключительной важности символического метода желательно разобрать числовой пример на его применение, включая переход от символического изображения искомой величины к оригиналу — ее мгновенному значению. На примере моста и схемы преобразования неизменного напряжения в неизменный ток или других схем следует также рассмотреть применение символического метода для решений задач в общем виде. Целесообразно также рассмотреть метод дуальных цепей применительно к символической записи с решением задачи, например, на составление схемы преобразования неизменного тока в неизменное напряжение.

После символического метода в учебниках обычно рассматриваются цепи с взаимной индукцией, а затем четырехполюсники, так как последние являются обобщением для всех цепей. Однако при рассмотрении четырехполюсников индуктивная связь упоминается один раз при ссылке на трансформатор, а все изложение ведется на основе цепей без взаимоиндукции. Это целиком относится и к излагаемым далее круговым диаграммам. Поэтому методически целесообразней излагать четырехполюсники и круговые диаграммы до цепей с взаимоиндукцией, расчет которых, как известно, гораздо сложнее и принципиально отличается от расчета цепей только с кондуктивной связью, ведущегося формально так же, как и расчет цепей постоянного тока.

4. Основы теории четырехполюсников и фильтров

Сначала нужно подчеркнуть обобщающую роль теории четырехполюсников — рассмотрение в общем виде передачи энергии через пассивное или активное звено. Уравнения пассивных четырехполюсников проще вывести не на основе контурных токов, как это сделано в учебнике [9], или узловых напряжений в [13], а путем замены приемника с напряжением \dot{U}_2 источником напряжения — \dot{U}_2 и применения наложения, как это сделано в [12 и 14] (в последнем — для четырехполюсников постоянного тока):

$$\dot{I}_1 = Y_{11}\dot{U}_1 - Y_{12}\dot{U}_2, \quad \dot{I}_2 = Y_{21}\dot{U}_1 - Y_{22}\dot{U}_2;$$

здесь Y_{11} и Y_{22} — входные, а Y_{12} и Y_{21} — взаимные проводимости. Отсюда сразу получаются уравнения четырехполюсника и связь $AD - BC = 1$ между его параметрами. Показывается, что при обратном питании параметры A и D меняются местами. Затем эти уравнения выражаются через напряжения и токи холостого хода и короткого замыкания и строится нагрузочная диаграмма по данным этих двух опытов, причем для симметричного четырехполюсника угол сдвига фаз между векторами $\dot{U}_{1x,x}$ и $\dot{I}_{1k,z}$ равен заданному углу φ_2 сдвига фаз в нагрузке.

Рассматривается аналитическое определение параметров для Т- и П-схем и экспериментальное их определение из опытов холосто-

го хода и короткого замыкания, повторное сопротивление и коэффициент распространения симметричного четырехполюсника, после чего уравнения четырехполюсника переписываются с использованием гиперболических функций, а также вводится понятие передаточных функций, равных отношению выходной величины к входной. В ряде электротехнических и автоматических устройств необходимо, чтобы передаточная функция зависела от режима цепи на выходе. Поэтому здесь целесообразно рассмотреть простую схему *обратной связи* с помощью регулирования передаточной функции дополнительного четырехполюсника, например, питаемого выходным напряжением основного четырехполюсника, а выходное его напряжение включено последовательно с источником первичного напряжения.

Электрические фильтры являются предметом изучения специальных курсов, поэтому в курсе ТОЭ достаточно ознакомиться лишь с основами их теории. Сначала следует рассмотреть цепные схемы, n звеньев которых — четырехполюсники — одинаковы и симметричны, и показать, что в случае нагрузки последнего звена его повторным сопротивлением, оно будет равно входному сопротивлению всей цепной схемы, но коэффициент распространения увеличится в n раз. Далее рассматриваются электрические фильтры в виде четырехполюсников или цепных схем, которые должны пропускать к приемнику только токи заданного диапазона частот. Надо показать, что фильтр без затухания в области пропускания состоит из реактивных элементов, причем сопротивление приемника должно быть равно повторному сопротивлению фильтра при всех частотах его диапазона, т. е. должно меняться с частотой по закону, заданному фильтром. Но даже при этом вне области пропускания фильтр не является идеальным, так как коэффициент затухания нарастает постепенно с изменением частоты, а не становится сразу равным бесконечности. В этом направлении следует исследовать простейшие Т- и П-схемы низкочастотных и высокочастотных фильтров; при их последовательном соединении можно получить полосный фильтр. Надо указать, что цепные схемы, состоящие из элементарных фильтров, с увеличением числа этих звеньев приближаются к идеальному фильтру.

Затем вкратце следует рассмотреть активные четырехполюсники, показав, что они приводятся к пассивным путем замены внутренних источников энергии внешними. Тут же надо указать на широкое применение в электротехнике активного четырехполюсника, в котором источник энергии механический — электромашинный генератор.

В заключение надо упомянуть об особом виде четырехполюсника — гираторе, не потребляющем и не развивающем активной мощности. Надо указать на основное свойство гиратора — преобразование источника напряжения на входе в источник тока на выходе и наоборот и отметить, что для него не выполняется уравнение связи между параметрами четырехполюсника, т. е. $AD - BC \neq 1$.

5. Линейные и круговые диаграммы

Эта тема представляет большой интерес для электротехников; этими диаграммами стали пользоваться и радиотехники. Обычно в учебниках сначала излагается чисто геометрическим способом метод инверсий в декартовой плоскости с последующим переходом на комплексную плоскость. Векторные уравнения излагаются позже с использованием теорем из метода инверсий об обращении прямой и круга, не проходящих через полюс. В результате этот раздел выпадает из общего стиля изложения и занимает много времени.

Более логичным и коротким является непосредственное использование векторных уравнений, вытекающих из символической записи переменных величин. Сначала проще всего рассмотреть изменение модуля или аргумента комплексного сопротивления, т. е.

$$Z = pze^{jq} \text{ или } Z = ze^{jq},$$

где p и q — изменяющиеся безразмерные вещественные числа.

Тогда векторы Z изображаются геометрическим местом точек (г. м. т.): первый — прямой, второй — окружностью. Искомое выражение вектора напряжения или тока в заданной цепи с таким сопротивлением представляется векторным уравнением, которое получится в результате ряда алгебраических действий, в том числе обращения, над заданными величинами и изображается также прямой или окружностью. Следовательно, нужно рассмотреть эти действия над г. м. т. Например, представляя векторное уравнение окружности радиуса R с радиус-вектором центра R_0 в виде дробно-линейной функции

$$V = R_0 + Re^{jq} = \frac{A + pB}{C + pD},$$

можно видеть, что ее обращение дает также окружность, не проходящую через начало координат. Эти общие соотношения применяются к цепям переменного тока, рассматривается выбор масштабов, упрощающих диаграммы.

После этого можно перейти к примерам. Хотя рассмотренный метод заключается в построении результирующей кривой, вычисленной по условиям задачи, но первый пример — диаграмму линии передачи при $\cos \varphi_2 = \text{const}$ — целесообразно рассмотреть, строя последовательно все кривые — сопротивления, проводимости, тока и мощностей цепи, потерь и полезной, а затем рабочие диаграммы в функциях мощности и тока приемника. Во втором примере целесообразно рассмотреть построение сразу результирующей кривой, например, г. м. т. вектора тока четырехполюсника при неизменном входном напряжении и переменном сопротивлении $pZ = pze^{jq}$ приемника по аналитическому расчету, дающему уравнение окружности, не проходящей через начало координат. Интересно также показать, что при питании приемника pZ через активный четырехполюсник г. м. т. вектора входного тока также будет окружностью.

6. Цепи со взаимной индукцией

Напомнив о параметре «взаимоиндуктивность» (п. 7а, гл. VII), надо на примере двух катушек ввести понятие об их *одноименных зажимах*. При этом целесообразно, выбрав одинаковое положительное направление для их э.д.с., напряжений и токов относительно одноименных зажимов, сравнить выражения для э.д.с. самоиндукции $-L \frac{di}{dt}$ одной катушки с э. д. с. взаимной индукции $-M \frac{di}{dt}$ другой.

Далее рассматриваются последовательное и параллельное соединения двух катушек с взаимной индукцией при согласном и встречном включениях, подсчитываются результирующие индуктивности этих катушек и всей цепи. Особое внимание здесь уделяется явлению *ложной емкости*, но надо подчеркнуть, что при этом цепь в целом остается индуктивной.

Затем рассматривается расчет сложных цепей с взаимной индукцией символическим методом и уточняется правило знаков при составлении уравнений по Кирхгофу. Указывается на возможность применения методов контурных токов и наложения, а также метода эквивалентного источника для тока ветви, не связанной взаимной индукцией с остальной частью цепи, и на невозможность применения метода узловых напряжений, а также метода преобразования в общем случае.

После этого излагается теория трансформатора без стального сердечника на основе системы из двух уравнений по второму закону Кирхгофа сначала для мгновенных значений в общем случае, затем для синусоидального тока в символической записи, из которой определяются токи по заданным входному напряжению и параметрам трансформатора и нагрузки. Здесь следует уяснить физический смысл вносимых сопротивлений и изложить вывод Т-образной эквивалентной схемы, в частности, для приведенного трансформатора с одинаковым числом первичных и вторичных витков.

Переходя к трансформатору со стальным листовым сердечником, надо показать его технико-экономические преимущества, рассмотреть вихревые токи в сердечнике как одно из проявлений взаимной индукции, подсчитать потери в листе и показать, что наличие потерь в сердечнике на вихревые токи и гистерезис отражается в эквивалентной Т-схеме трансформатора активным поперечным сопротивлением. Надо указать, что из-за стального сердечника поперечная индуктивность эквивалентной схемы трансформатора будет нелинейной и ток в ней — несинусоидальным, но ввиду его малости по сравнению с практически синусоидальными первичным и вторичным токами при нагрузке можно считать все токи синусоидальными и изображать их векторами. На основе эквивалентной схемы строится векторная диаграмма трансформатора со стальным сердечником, а также в линейном приближении — векторная диа-

грамма катушки со стальным сердечником, как частный случай холостого хода трансформатора.

В заключение рассматривается резонанс в двух индуктивно связанных цепях на примере трансформаторной связи и показывается, что частотные характеристики токов обоих контуров с малым активным сопротивлением имеют два максимума и один минимум.

7. Трехфазные цепи

Дав определение многофазной системы в общем случае, следует сразу перейти к трехфазным системам на основе генератора, аналогичного однофазному (см. п. 1 этой главы), но с тремя катушками. Симметричная система их э.д.с. записывается для мгновенных значений, а на основе векторной диаграммы — в комплексной форме с оператором $e^{j2\pi/3}$ поворота на угол $\frac{2\pi}{3}$.

Затем рассматривается соединение звездой с нулевым проводом и без него при одинаковой и неодинаковой нагрузках фаз. Для расчета этой цепи и записи узлового напряжения используется вывод для двухузловой цепи постоянного тока (см. п. 2, гл. IX). Отмечается практически независимая работа фаз при нулевом проводе относительно малого сопротивления и зависимая — без него. В качестве примера интересно рассмотреть прибор для определения порядка следования фаз.

При рассмотрении соединения треугольником подчеркивается практически независимая работа фаз при относительно малом сопротивлении линейных проводов, а для расчета такой цепи в общем случае указывается на возможность использовать преобразование схемы треугольника в звезду, также известного из гл. 2, гл. IX.

При изложении соединения ветвей в звезду и треугольник необходимо также рассмотреть эти цепи при одинаковой нагрузке фаз с взаимной индукцией, а звезду с нулевым проводом — при питании нулевой системой фазных напряжений, чтобы далее показать разницу в эквивалентных индуктивностях фаз для прямой и обратной симметричных систем и нулевой системы.

При переходе к вопросу о мощности трехфазных систем сначала следует показать постоянно мгновенной мощности симметричной трехфазной системы, подчеркнув преимущество в этом над однофазной системой. Хотя методы измерения являются предметом курса электротехники, но так как он изучается обычно позже, приходится измерение мощности в трехфазных цепях рассмотреть здесь, чтобы подготовить учащихся к выполнению работ по трехфазным системам в лаборатории ТОО. Необходимо упомянуть о том, что определение реактивной Q и полной S мощности, данное для однофазного тока, в общем случае для трехфазных цепей неприменимо. Следует также показать экономию в меди при передаче энергии трехфазным током по сравнению с однофазным при тех же мощности, $\cos \varphi$ и к.п.д.

Вопрос о вращающемся поле приходится излагать в курсе ТОЭ, так как, помимо курса электрических машин, где этот вопрос мог бы быть изложен особенно полно, вращающееся поле используется в электроизмерительной технике. Экономнее всего это изложение вести на основе введения постоянного вектора \dot{B}_m , условно изображающего синусоидально-распределенную в зазоре машины магнитную индукцию, аналогично тому, как это общепринято для величин, изменяющихся по синусоиде во времени. Тогда такое поле, но пульсирующее во времени по синусоидальному закону, можно условно изобразить вектором $\dot{B}_m \cos \omega t$. Показав с помощью формулы Эйлера, что пульсирующее синусоидально распределенное поле $\dot{B}_m \cos \omega t$ разлагается на два вращающихся:

$$\dot{B}_m \cos \omega t = \frac{1}{2} \dot{B}_m e^{j\omega t} + \frac{1}{2} \dot{B}_m e^{-j\omega t},$$

следует просуммировать пульсирующие поля трех фаз, что сразу даст вращающееся поле, как сумму прямых полей, так как обратные поля в сумме дают нуль. Указывается на использование вращающегося поля в трехфазных двигателях.

Основы метода симметричных составляющих целесообразно изложить здесь же, дав аналитический и графический методы разложения несимметричной системы векторов, а также экспериментально с помощью фильтров, на симметричные составляющие. Надо подчеркнуть важность этого метода применительно к электрическим машинам, так как он позволяет в линейном приближении упростить расчет, например при несимметричной системе напряжений, питающей трехфазный электродвигатель, применив принцип наложения для ее симметричных составляющих. При этом надо учесть, что эквивалентные индуктивности для каждой составляющей будут различными.

8. Периодические несинусоидальные напряжения и токи в линейных цепях

Вначале надо сказать, что в этом случае для расчетов используется принцип наложения на основе ряда Фурье. Напоминаются две тригонометрические формы этого ряда и выражения для их коэффициентов, а также дается приближенное графическое разложение методом равноотстоящих ординат. Следует указать, что практически всегда приходится представлять заданную кривую конечным числом гармоник и что при выборе их амплитуд по Фурье получается наименьшая квадратичная ошибка. Затем рассматривается разложение в ряд Фурье кривых, обладающих той или иной симметрией, когда второй полупериод представляет собой зеркальное отображение кривой первого полупериода по оси абсцисс и когда вид такой кривой полностью характеризуется четвертью ее периода. Затем вычисляются действующие значения тока и напряжения, а также среднее значение абсолютной величины ор-

динат кривой за период и вводятся характеризующие кривую коэффициенты: искажения, амплитуды и формы.

На основе выражения для *мгновенной мощности* в общем случае определяются частоты ее составляющих и вычисляется значение средней мощности. Указывается, что простой перенос понятий о реактивной и полной мощности синусоидального тока на случай сложной формы невозможен. Эти величины надо определять заново; дается обычное определение *полной мощности*

$$S = UI = \sqrt{(\sum U_k^2)(\sum I_k^2)}$$

и два определения *реактивной мощности*

$$Q' = \sqrt{S^2 - P^2} \text{ и } Q'' = \sum U_k I_k \sin \varphi_k;$$

для последнего определения приходится ввести *мощность искажения*

$$T = \sqrt{S^2 - P^2 - (Q'')^2}.$$

На примере цепей с сопротивлением, индуктивностью и емкостью показывается применение *принципа независимости гармоник*, т. е. принципа наложения, применяемого далее для расчета линейных сложных цепей, и рассматривается резонанс на отдельных гармониках. Подчеркивается подобие кривых напряжения и тока в активном сопротивлении, независимым от частоты, приближение вида кривой тока к синусоиду в цепи с индуктивностью и обратный эффект — в цепи с емкостью.

Затем рассматриваются фильтры: Г-образный, уменьшающий пульсации напряжения относительно постоянной составляющей на приемнике по сравнению с генератором, и резонансные, ослабляющие или выделяющие какие-либо гармоники в кривой тока по сравнению с кривой напряжения.

После этого излагается вопрос о высших гармониках в трехфазных системах. Сначала показывается, что отдельные гармоники дают системы прямой, обратной или нулевой последовательности. Для этих систем определяются суммы всех трех векторов и разности двух векторов и применяют эти выводы для случая соединения в треугольник и звезду с нулевым проводом и без него. Подчеркивается разница отсутствия гармоник, кратных трем, в линейных напряжениях генератора, соединенного в звезду или треугольник, и наличие только этих гармоник в узловом напряжении при соединении в звезду без нулевого провода и в кривой тока в нулевом проводе. Показывается отрицательная роль высших гармоник в двигателях с вращающимся магнитным полем.

Затем излагается вопрос о биениях, возникающих при сложении колебаний с равными амплитудами и близкими по частоте. Показывается возникновение полуразностной и полусуммарной частот и область практического использования биений.

В заключение рассматриваются модулированные колебания, возникающие при изменении во времени амплитуды, или

частоты, или фазы. Подчеркивается возникновение боковых частот и указывается на использование модулированных колебаний, в частности, в радиотехнике.

9. Нелинейные цепи переменного тока

Упомянув о широком использовании нелинейных электрических и магнитных цепей для создания разнообразной аппаратуры, надо указать, что характеризующие их уравнения, составляемые на основе законов Кирхгофа для мгновенных значений напряжений u и токов i или их аналогов для магнитных цепей, в общем случае будут нелинейными дифференциальными уравнениями. Для их решения приходится применять приближенные методы. В случае тепловой инерционности нелинейных элементов зависимость $u(i)$ будет линейной, что упростит расчеты, но при этом надо учесть нелинейную связь действующих значений $U(I)$.

После этого введения надо перейти к первой части темы — методам анализа нелинейных цепей. Это целесообразно сделать на примере определения зависимости $i(t)$ при заданной синусоидальной зависимости $u(t)$, ограничившись пока применением методов к одной и той же цепи — катушке индуктивности со стальным сердечником. Помимо экономии времени это упростит восприятие и сравнение методов учащимися. Сначала, пренебрегая активным сопротивлением катушки, излагаются графический метод и метод математической аппроксимации и кривой намагничивания, в том числе при наличии обмоток и постоянного и переменного токов, с определением эквивалентной индуктивности. Потом для случая, когда пренебречь активным сопротивлением катушки нельзя, излагаются методы гармонического баланса и кусочно-линейной аппроксимации. Интересно показать дуальность цепи с нелинейной катушкой и цепи с сегнетоэлектрическим конденсатором.

Второй частью этой темы является краткое описание нелинейных устройств. Сначала следует рассмотреть те, которые основаны на нелинейной зависимости мгновенных значений напряжения и тока: утроители и удвоители частоты и вентильные выпрямители. Рекомендуется также изложить принцип действия ферромагнитных запоминающих элементов вычислительных машин; опыт показывает, что учащиеся особенно интересуются использованием изучаемого ими курса ТОЭ в новой технике.

Затем рассматриваются явления и устройства, основанные на нелинейной зависимости действующих значений напряжения и тока — феррорезонанс напряжений и ферромагнитные стабилизатор напряжения и усилитель мощности. На примере феррорезонансных схем следует показать особенности частотных свойств нелинейных систем и отметить возможность возникновения в них субгармоник. Надо подчеркнуть применение субгармоник в делителях частоты и указать на возможность возникновения перенапряжений в системе за счет резонанса на субгармонике.

Заключая тему, интересно указать на возможность дуальных процессов и устройств: сегнеторезонанса токов, сегнетоэлектрического стабилизатора тока и также усилителя мощности.

10. Переходные процессы в линейных цепях и их расчет классическим методом

Приступая к изучению переходных процессов в цепях со сосредоточенными параметрами, первым надо изложить классический метод составления и решения дифференциальных уравнений, так как он отражает физическую картину процессов. Постулируя невозможность в макромире скачкообразных изменений энергии, показывают обязательность плавного изменения тока в индуктивности и напряжения на емкости, что определяет также и начальные условия. Надо указать, что для расчета переходных процессов составляет система уравнений по законам Ома и Кирхгофа для мгновенных значений напряжений и токов, которая приводится к одному линейному обыкновенному дифференциальному уравнению для одного из напряжений и токов. Его порядок равен числу независимых начальных условий для необъединяемых индуктивностей и емкостей. Напоминается, что решение уравнения, т. е. определение переходной величины, состоит из суммы принужденной составляющей, в качестве которой рекомендуется брать установившееся значение искомой величины, и свободной составляющей. Так как последняя равна общему виду переходной величины при коротком замыкании цепи, при изучении разных переходных процессов в различных цепях целесообразно сначала сразу рассмотреть их короткое замыкание, а общий вид переходной величины использовать как свободную составляющую для других переходных процессов в этой цепи.

Первыми исследуются переходные процессы в цепи с последовательным соединением сопротивления и индуктивности, причем уравнения составляются относительно тока, так как тогда индуктивное напряжение определяется сразу путем дифференцирования $(u_L = L \frac{di}{dt})$, а не интегрированием с необходимостью определения произвольной постоянной, если найти ток по индуктивному напряжению $(i = \frac{1}{L} \int u_L dt)$. При рассмотрении короткого замыкания этой цепи вводится понятие постоянной времени, определяется э.д.с. самоиндукции, поддерживающая ток, и подсчитывается энергия, полученная сопротивлением от индуктивности. При замыкании этой цепи на добавочное сопротивление подчеркивается возникновение перенапряжения. Результаты исследования включения цепи на постоянное напряжение используются при рассмотрении поведения тока в цепи с изменяющимся сопротивлением. В зависимости от фазы включения цепи на синусоидальное напряжение показывается возможность возникновения перенапряжения или сверхтока.

Затем рассматриваются переходные процессы при коротком замыкании и включении на постоянное и переменное напряжения цепи с сопротивлением и емкостью; в этом случае целесообразно уравнение составить относительно напряжения на конденсаторе, а не относительно тока, по аналогичной причине. Здесь следует обратить внимание на аналогичию поведения i_L и u_C , низкий к.п.д. зарядки конденсатора постоянным напряжением, а при включении этой цепи на переменное напряжение — возможность перенапряжения на емкости или сверхтока, причем последний может быть очень большим.

Аналогично, относительно u_C составляется уравнение для разряда конденсатора на индуктивность и сопротивление, причем сначала рассматривается аperiodический и периодический случаи для разных корней характеристического уравнения, а потом критический случай. Для аperiodического случая следует отметить плавное уменьшение напряжения на емкости, первоначальный скачок напряжения на индуктивности с последующей переменной знака, сначала рост, а потом убывание тока. Для периодического случая отмечается частота незатухающих и затухающих колебаний, для критического — протекание процесса, подобное аperiodическому.

Затем рассматривается включение этой цепи на постоянное и переменное напряжения, причем для последнего случая приходится в случае недостатка времени ограничиться общими соображениями. Все задачи иллюстрируются графиками, на которых следует показать также значения величин до начала переходного процесса слева от оси ординат.

Приступая к сложным цепям, дается рекомендация при переходе от системы уравнений с несколькими неизвестными к одному уравнению получить его или для тока какой-либо индуктивности, или для напряжения на емкости по указанной выше причине. Затем целесообразно решить в общем виде задачу по расчету сложной цепи, например при последовательно-параллельном соединении ветвей, с включенной емкостью в последовательной ветви и индуктивностью в одной из параллельных. Необходимо также рассмотреть переходные процессы в цепях с взаимной индукцией, хотя бы на простом примере включения нагруженного трансформатора на постоянное напряжение.

Учитывая развитие импульсной электротехники, следует рассмотреть возникающие при этом переходные процессы, причем достаточно ограничиться случаем периодических прямоугольных импульсов напряжения, на которое включается простая электрическая цепь r, L .

Здесь надо рассмотреть три метода расчета: 1) способ «шаг за шагом», использующий известные из предыдущего выражения для тока при включении этой цепи на постоянное напряжение и при ее коротком замыкании; 2) способ наложения, предполагающий, что первый импульс продолжается бесконечно, но в начале первой паузы цепь переключается на напряжение обратного знака

той же величины и т. д. и 3) способ суммирования действия отдельных импульсов.

В заключение этой темы следует отметить общепринятость и наглядность классического метода и вместе с тем его сложность из-за необходимости определения постоянных интегрирования и преобразования системы уравнений в уравнение с одним неизвестным.

11. Переходные процессы в нелинейных цепях

В начале этой темы целесообразно рассмотреть вопрос об *устойчивости* режима в нелинейной цепи. Простым примером может быть питаемая постоянным напряжением цепь с последовательным соединением линейной индуктивности, линейного сопротивления и электрической дуги. Пересечения падающей вольт-амперной характеристики дуги и прямолинейной характеристики сопротивления показывают, что здесь возможны два равновесных режима. Надо объяснить, что один из них устойчив, так как при возможном кратковременном изменении тока в цепи возникает э.д.с. самоиндукции, приводящая к возвращению к этому режиму; при отступлении же от второго режима эта э.д.с. переводит цепь в первый режим или уменьшает ток до нуля. Затем анализ устойчивости в этой цепи следует провести аналитически — методом малых приращений, при которых дифференциальное сопротивление нелинейного элемента вблизи равновесных режимов может считаться постоянным, что превращает нелинейное дифференциальное уравнение для тока в линейное и позволяет сразу получить оценку устойчивости каждого из двух равновесных режимов.

Приступая к изучению переходных процессов, надо показать, что в цепях со сосредоточенными нелинейными параметрами *начальные условия* определяются невозможностью скачкообразных изменений зарядов q емкостей, а не напряжений на них, и потокоцеплений Ψ индуктивностей, а не токов, так как именно от q и Ψ зависит энергия, запасаемая в этих элементах цепи, и здесь возможны скачки u_C и i_L . Затем излагаются приближенные методы расчета переходных процессов в нелинейных цепях, сначала — метод линеаризации интервалов, например, для автоколебательной цепи с последовательным соединением сопротивления и газоразрядной лампы, шунтированной конденсатором. Другие методы целесообразно изложить на одном примере — переходном процессе при включении на постоянное напряжение катушки индуктивности со стальным сердечником, что так же, как и при изучении методов расчета установившихся режимов в этой цепи, дает экономию времени и упростит восприятие и сравнение методов учащимися; при этом катушка также заменяется простой эквивалентной схемой с последовательным соединением нелинейной индуктивности и линейного сопротивления.

В методе частичной линеаризации линеаризуется ак-

тивное напряжение с последующим уточнением методом графического интегрирования. Метод последовательных равных интервалов времени использует значения Ψ в начале и конце каждого интервала из основной кривой намагничивания $\Psi(i)$. В методе кусочно-линейной аппроксимации эта кривая заменяется ломаной, состоящей из прямых участков, что для них позволяет линеаризовать расчеты. В методе аналитической аппроксимации эта кривая выражается аналитически, например, $i = a\Psi^2$, что позволяет вычислить искомые зависимости $\Psi(t)$ и $i(t)$. Затем показывается применение одного из методов для той же цепи при переменном токе, например метода частичной линеаризации при включении цепи на синусоидальное напряжение. Здесь надо показать возможность значительных сверхтоков.

Тема классического метода исследования переходных процессов в линейных и нелинейных цепях заканчивается изложением метода изображения процессов в фазовой плоскости, по оси абсцисс которой откладывается исследуемая величина x , по оси ординат — скорость ее изменения $y = \frac{dx}{dt}$, что определяет изображающую точку, перемещающуюся по фазовой траектории. Надо подчеркнуть, что движение изображающей точки всегда происходит в определенном направлении — по часовой стрелке. В качестве первого примера проще всего рассмотреть короткое замыкание катушки индуктивности в линейном и нелинейном случаях. Затем надо исследовать случаи, описываемые дифференциальными уравнениями второго порядка, при коротком замыкании линейной цепи с последовательным соединением L и C , когда фазовой траекторией будет эллипс, со спиральной фазовой траекторией при наличии в этой цепи малого активного сопротивления и с большим, превращающим траекторию в параболическую. Для нелинейной цепи достаточно рассмотреть нарастающий колебательный процесс, когда разворачивающаяся спираль заканчивается переходом на замкнутую траекторию — предельный цикл; это можно проиллюстрировать примером цепи с автоколебаниями. Следует указать, что этот метод позволяет решать многие задачи электротехники по виду фазовой траектории без решения дифференциальных уравнений и что фазовую траекторию можно наблюдать на экране электронно-лучевого осциллографа, подав на одну пару отклоняющих пластин исследуемую величину x , а на другую пару — производную по времени от x .

12. Расчет переходных процессов методами наложения, спектральным и операторным

Излагая метод наложения для расчета переходного процесса при включении линейной цепи на напряжение, являющееся функцией времени, следует использовать обе формы интеграла Дюамеля. При этом должна быть четко показана разница в их

выводе. Для первой формы осуществляется наложение токов, вызываемых отдельными постоянными составляющими напряжения, включаемыми со сдвигом во времени. Для второй формы, называемой импульсным интегралом Дюамеля, суммируются токи от отдельных прямоугольных импульсов напряжения, следуемых друг за другом. Здесь следует обратить внимание на важность понятия об импульсах напряжения и их воздействия на электрическую цепь. В настоящее время весьма широко стали использоваться импульсные воздействия источников энергии на различные электрические цепи — появилась так называемая «импульсная техника». Метод наложения надо иллюстрировать, например, включением цепи r, L на затухающее по показательному закону напряжение, применив обе формы интеграла Дюамеля, и рекомендовать применение для каждой задачи той его формы, для которой подынтегральное выражение упрощается.

Спектральный метод обычно излагается позже операторного, однако обратный порядок выгодней, так как даст экономию времени на их обоснование. Вначале целесообразно сравнить спектральный метод с методом наложения. В последнем было применено предварительное разложение входной неперiodической функции времени $f(t)$ на постоянные составляющие, в спектральном методе $f(t)$ представляется в виде суммы бесконечно большого числа бесконечно малых гармоник. Затем на основе выражения комплексной амплитуды гармоники периодической функции выводится *прямое преобразование Фурье* для неперiodической функции $f(t)$ в ее изображение $F(j\omega)$ — *спектральную характеристику*, что возможно при конечном значении интеграла Фурье. Это является первым этапом спектрального метода расчета переходных процессов. Умножение $F(j\omega)$ на *передаточную функцию* $K(j\omega)$ дает изображение искомой величины; надо подчеркнуть, что в отличие от аналогичной величины — *переходной функции*, характеризующей переходный процесс при воздействии на цепь постоянного напряжения, передаточная функция характеризует установившийся процесс при синусоидальном воздействии.

Затем выводится формула *обратного преобразования* спектральной характеристики выходной величины в ее оригинал — искомую функцию времени. Теория иллюстрируется решением задачи, например, воздействия на какую-либо цепь прямоугольного импульса напряжения. В заключение надо сказать об области применения этого метода в изложенном виде для абсолютно интегрируемых функций и для задач с нулевыми начальными условиями. Ценность метода — сведение расчета переходных процессов к расчету установившихся режимов в цепях синусоидального тока, т. е. без составления и решения дифференциальных уравнений.

Операторный метод может быть выведен из предыдущего следующим образом. Пусть функция $f(t)$ не удовлетворяет условию абсолютной интегрируемости. К вспомогательной функции

$$F(t) = f(t)e^{-\sigma t},$$

где σ — достаточно большое положительное вещественное число, обеспечивающее интегрируемость $F(t)$, применяются преобразования Фурье, переходящие в этом случае в *прямое и обратное преобразования Лапласа*. Вводится оператор $p = \sigma + j\omega$, указывается на возможность операций над операторными изображениями с последующим возвратом к оригиналу. На этой основе надо подчеркнуть, что преобразования Фурье являются частным случаем преобразований Лапласа, но применимость последних шире, так как не накладывается требование абсолютной интегрируемости функции $f(t)$. Затем, как обычно, вычисляются операторные изображения некоторых функций и, особенно важно, производной и интеграла. В операторной форме выражаются законы Ома и Кирхгофа для ненулевых и нулевых начальных условий и доказывается *теорема разложения*, дающая более простой переход от изображения к оригиналу, чем обратное преобразование Лапласа.

Так как операторный метод шире спектрального и приобрел большое распространение, целесообразно решить несколько разнообразных задач для простых и сложных цепей постоянного и переменного токов с нулевыми и ненулевыми начальными условиями, используя таблицы изображений или теорему разложения, в том числе задачи, решенные ранее другими методами. Можно рекомендовать следующие задачи: включение цепей на затухающее по показательному закону напряжение, а также на синусоидальное напряжение, включение цепи r, L, C на постоянное напряжение при нулевых начальных условиях, а также короткое замыкание этой цепи, ранее включенной на синусоидальное напряжение и включение трансформатора на постоянное напряжение.

Полученный опыт позволяет затем оценить достоинства и область применения операторного метода:

1) распространение методики составления уравнений и расчета цепей при установившихся режимах постоянного и синусоидального токов на переходные процессы;

2) алгебраизация дифференциальных уравнений;

3) учет начальных условий сразу в операторных изображениях.

Вместе с тем надо указать, что операторный метод может применяться только для расчета переходных процессов в линейных цепях и требует, подобно классическому методу, решения того же самого характеристического уравнения, что затруднительно при высокой степени последнего.

13. Обобщенные методы расчета линейных электрических цепей

Вначале надо напомнить, что расчет линейных электрических цепей аналогичен для всех их режимов. Он заключается в составлении и решении системы алгебраических уравнений, связывающих напряжения, токи и сопротивления или проводимости ветвей цепи. При этом в случае установившихся режимов постоянного тока — это реальные величины U, I, R или G , синусоидально-

го — символические изображения \dot{U} , \dot{I} , \dot{Z} или \dot{Y} , а при переходных процессах — операторные изображения $U(p)$, $I(p)$, $Z(p)$ или $Y(p)$. Затем в двух последних случаях осуществляется переход от изображений искомых величин к их оригиналам — реальным мгновенным значениям напряжений $u(t)$ и токов $i(t)$.

Поэтому целесообразно ряд методов расчета сложных цепей обобщить и изложить вместе для всех режимов. Приступая к этой теме, следует предупредить слушателей, что излагаемые далее методы относительно сложны и дают экономию расчетного времени по сравнению с уже известными им «классическими» методами только для сложных цепей и тем большую, чем сложнее цепь.

Метод определителей особенно удобен для решения системы однотипных уравнений для контурных токов или узловых напряжений, так как тогда решения для всех искомых величин будут также однотипными. Хотя этот метод известен студентам из курса математики, целесообразно его напомнить, чтобы учащиеся прочувствовали в дальнейшем разницу между определителем и матрицей. На основе, например, системы уравнений сложной цепи синусоидального тока при заданных сопротивлениях ветвей и э. д. с. источников по методу контурных токов напоминаются однотипные решения для этих токов, содержащих определитель и его алгебраические дополнения. Затем метод иллюстрируется решением несложной задачи.

Матричный метод для сравнения с предыдущим целесообразно излагать также на основе системы уравнений синусоидальных контурных токов. Здесь группы комплексных искомых токов \dot{I}_i и свободных членов — э. д. с. \mathcal{E}_i источников записываются в виде *столбцовой матрицы*. Группа коэффициентов при неизвестных, т. е. комплексных сопротивлений Z_{ik} , записывается в виде *квадратной матрицы*; при этом надо подчеркнуть, что, хотя запись этой матрицы подобна записи определителя, матрица является набором отдельных элементов, определитель же равен определенному числу. Надо также обратить внимание на правильную запись условных символов этих матриц, например жирным вертикальным шрифтом $\dot{\mathbf{I}}$, \mathbf{E} , \mathbf{Z} , в отличие от перечисленных выше комплексов, записываемых обычным наклонным шрифтом. В результате матричная запись системы уравнений (1) и ее решения (2) получается предельно простой:

$$\mathbf{Z}\dot{\mathbf{I}} = \mathbf{E} \quad (1)$$

и

$$\dot{\mathbf{I}} = \mathbf{Z}^{-1}\mathbf{E}. \quad (2)$$

Приведя из матричной алгебры значение обратной матрицы \mathbf{Z}^{-1} , выраженное через определитель и алгебраические его дополнения исходной матрицы \mathbf{Z} , и правило умножения квадратной матрицы \mathbf{Z}^{-1} на столбцовую \mathbf{E} , сразу получают искомые контурные токи путем приравнивания одноименных строк обеих матриц — тока $\dot{\mathbf{I}}$ и произведения $\mathbf{Z}^{-1}\mathbf{E}$.

Надо также показать аналогичное применение матричного метода для составления и решения системы уравнений цепи по законам Кирхгофа. При этом элементы исходной квадратной матрицы равны коэффициентам при искомым токам в уравнениях Кирхгофа, т. е. для первых ее строк, поочередно отражающих уравнения по первому закону, равны 0, или +1, или -1 в зависимости от наличия тока и его знака, а для остальных строк — сопротивлениям, т. е. коэффициентам при токах в уравнениях по второму закону Кирхгофа. Затем составляется обратная квадратная матрица, умножается на столбцовую матрицу E и приравниваются одноименные строки матрицы этого произведения и столбцовой матрицы искомым токам.

Топологический метод (метод ненаправленных графов) целесообразно изложить также для цепи синусоидального тока. Сначала надо обосновать название метода: схема цепи представляет собой геометрическую фигуру, свойства которой не зависят от ее размеров и вида очертаний. Затем для цепи с одним источником напряжения U , приключенным к одной паре ее узлов, дается — из-за недостатка времени без вывода — формула для передачи к току I любой ветви:

$$T = \frac{I}{U} = \frac{\sum S_k \Delta_k'}{\sum S_k \Delta_k}.$$

Члены этой формулы являются новыми понятиями, значения и способ вычисления которых приводятся в учебниках ТОЭ; S_k — величина *пути*, S_k' — величина *пути передачи*, Δ_k и Δ_k' соответственно *алгебраические дополнения пути* и *пути передачи*. После вычисления этих величин определяется передача T и по заданному напряжению U — искомый ток $I = TU$.

После изложения этого трудного для восприятия метода для конкретизации перечисленных выше новых понятий надо его иллюстрировать простым примером, например, определением тока в одной из ветвей неравновесного моста переменного тока по заданному напряжению источника.

В заключение следует обобщить особенности топологического метода:

- 1) расчет ведется на основе схемы цепи, ветви которой характеризуются проводимостями;
- 2) расчет проводится по формулам для ряда величин, характеризующих топологические свойства цепи, без составления уравнений по законам Кирхгофа;
- 3) метод применим только для цепей с одним источником энергии; при наличии нескольких источников приходится использовать принцип наложения.

Метод направленных графов получает широкое распространение не только в теории электрических цепей, поэтому изложить его надо с достаточной полнотой. Сначала подчеркивается, что направленный граф цепи не повторяет электрическую цепь, а представляет собой графическое изображение системы уравнений

цепи, связывающих характеризующие ее величины. Затем вводятся новые понятия: *входной сигнал узла*, равный свободному члену системы уравнений, *выходной сигнал узла* — искомой величине, и *передача ветви* — их отношению, являющемуся функцией коэффициентов уравнений.

В качестве первого примера строится граф простой цепи, например T -образной схемы при перемещенном токе, для системы уравнений по методу контурных токов. Затем строятся графы более сложной цепи, например неравновесного моста переменного тока, для систем уравнений по законам Кирхгофа и по методу узловых напряжений. На их основе подчеркивается, что направленный граф цепи отличается от нее как по схеме, так и по числу узлов и ветвей, зависящих от метода составления изображаемых им уравнений. Следует сказать о возможности построения графа цепи сразу по ее схеме.

Переходя к использованию графа для определения по заданному напряжению источника (входному сигналу) тока приемника (выходного сигнала), сначала излагается метод последовательного упрощения графа; здесь можно ограничиться заменой контура петлей и ее исключением. Затем рассматривается метод Мэсона: без вывода приводится его общее выражение для передачи, сразу дающее выходной сигнал по входному. На примере рассмотренной сложной цепи показывается, как определяются члены этой формулы: величины путей по ветвям между узлами этих сигналов и определители всего графа и его частей, не касающихся отдельных путей. Подстановка их в формулу Мэсона сразу дает искомый ток. Отмечается, что решение методом Мэсона этой же задачи на основе графа системы уравнений по методу узловых напряжений является более простым, чем для графа системы уравнений по законам Кирхгофа. В заключение следует также указать, что экономия расчетного времени метода направленных графов по сравнению с классическими методами получается для сложных цепей и растет с увеличением их сложности.

14. Синтез электрических цепей

Начинают эту тему с задачи синтеза, т. е. построения электрической цепи, процессы в которой протекают по заданному закону, например, построение схемы и определение параметров двухполюсника с заданным комплексным сопротивлением $Z(j\omega)$ или операторным сопротивлением $Z(p)$, синтез четырехполюсника по заданному соотношению выходного и входного напряжений в установившемся или переходном режиме и т. п. Необходимо подчеркнуть, что задачи синтеза имеют неоднозначные решения, так как заданную характеристику может иметь ряд цепей, из которых надо выбрать простейшую, а некоторые задачи синтеза неразрешимы.

Так как конкретные задачи синтеза решаются в ряде специальных дисциплин, в курсе ТОЭ достаточно изложить теорию синтеза

линейных двухполюсников методами цепных и простых дробей, а по синтезу четырехполюсников и нелинейных цепей ограничиться простыми примерами.

Изложение метода цепных дробей целесообразно начать с синтеза двухполюсников по заданному операторному сопротивлению

$$Z(p) = \frac{a_0 p^a + a_1 p^{a-1} + \dots + a_a}{b_0 p^b + b_1 p^{b-1} + \dots + b_\beta}$$

путем постепенного деления числителя на знаменатель, приведя его к виду цепной дроби, которой соответствует цепная схема искомой цепи. На примере первого члена деления числителя на знаменатель надо показать, что синтез возможен, если степени их полиномов равны или отличаются на единицу, так как тогда этот член получает вид A , или Ap или $\frac{A}{p}$, где A — постоянная, т. е. представляет собой осуществимое операторное сопротивление — активное r , или индуктивное Lp , или емкостное $\frac{1}{Cp}$, или соответствующие проводимости.

Затем следует дать решение числовых задач: первой, в которой степени полиномов числителя и знаменателя заданного сопротивления $Z(p)$ равны, и второй, где они отличаются на единицу. На одном из этих примеров надо показать, что синтезируемая цепь получается другой, если расположить полиномы числителя и знаменателя по восходящим степеням.

Изложение синтеза двухполюсников методом простых дробей должно начинаться с указания, что в общем случае цепь, синтезируемая по ее операторному сопротивлению $Z(p)$, может быть представлена в виде последовательного соединения элементарных участков с сопротивлением r , Lp , $\frac{1}{Cp}$ и участков с параллельным соединением r и L , r и C , L и C . Затем на числовом примере с использованием разложения на простые дроби, обоснованного ранее при выводе теоремы разложения в операторном методе, надо показать, что синтезируемое сопротивление $Z(p)$, также заданное в виде частного двух полиномов, может быть преобразовано в сумму простых дробей, являющихся операторными сопротивлениями элементарных участков и тем самым соответствующую их последовательному соединению. Надо показать, что метод простых дробей при том же $Z(p)$ даст новый вариант синтезируемой цепи. Другие новые варианты получаются, если вместо $Z(p)$ исходить из проводимости $Y(p) = \frac{1}{Z(p)}$, а также применяя к части $Z(p)$ метод простых дробей, а к остальной — цепных дробей.

В качестве простейшего примера синтеза четырехполюсника следует рассмотреть задачу создания дифференцирующих и интегрирующих цепей, напряжение $u_2(t)$ на выходе которых пропорционально производной или интегралу напряжения $u_1(t)$ на входе.

Примером таких цепей является цепь с последовательным соединением r и C , питаемая напряжением $u_1(t)$, причем в дифференцирующей цепи сопротивление r , с которого снимается $u_2(t)$, относительно мало и тогда

$$u_2(t) = ri(t) = rC \frac{du_C(t)}{dt} \approx rC \frac{du_1(t)}{dt},$$

а в интегрирующей цепи r велико и тогда снимаемое с конденсатора напряжение

$$\begin{aligned} u_2(t) &= \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt \approx \frac{1}{C} \int_0^t \frac{u_1(t)}{r} dt = \\ &= \frac{1}{rC} \int_0^t u_1(t) dt. \end{aligned}$$

Следует отметить, что в обеих цепях $u_2(t) \ll u_1(t)$, из-за чего на выходе приходится применять усилители.

Примером синтеза нелинейной цепи может служить задача получения периодического пикообразного выходного напряжения при синусоидальном входном с помощью катушки с насыщенным стальным сердечником, ток которой при синусоидальном напряжении $u_1(t)$ имеет, как известно из п. 9 этой главы, пикообразную форму. При этом напряжение $u_2(t)$, снимаемое с малого r , последовательно включенного с катушкой, повторяет форму тока этой цепи.

15. Цепи с распределенными параметрами

Вначале надо напомнить, что по существу электрические устройства являются цепями с распределенными индуктивностью, емкостью и сопротивлением. При рассмотрении их в целом они заменяются эквивалентными схемами — цепями со сосредоточенными параметрами r , L , C , расчету которых был посвящен предыдущий материал курса ТОЭ. Однако в ряде случаев, например, при необходимости определения напряжения и тока в разных точках линии передачи переменного тока, надо рассматривать цепь такой, какая она есть в действительности, т. е. как цепь с распределенными параметрами. В курсе ТОЭ можно ограничиться расчетом процессов в двухпроводных однородных линиях, упомянув о том, что их теория лежит в основе теории линий электрической связи, а также трехфазных линий, широко применяемых в электроэнергетике.

Заменяя бесконечно малый элемент двухпроводной линии при переменном токе эквивалентной схемой с параметрами на единицу ее длины: продольными — индуктивностью L и сопротивлением r и поперечными — емкостью C и проводимостью g , надо подчеркнуть, что напряжение и ток в каждой точке линии будут не только функциями времени, но и зависеть от ее местоположения; расчет

несколько упрощается, если оно отсчитывается от конца линии. На этой основе выводится система уравнений в частных производных для мгновенных значений напряжений и токов:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -ri - L \frac{\partial i}{\partial t}, \quad \frac{\partial i}{\partial x} = gu + C \frac{\partial u}{\partial t}.$$

Ее решение целесообразно изложить сначала для более простого режима постоянного напряжения, так как тогда уравнения становятся обыкновенными дифференциальными уравнениями, в которых независимой переменной является расстояние от конца линии. Результаты их решения следует иллюстрировать графиком, показав на нем экспоненты, алгебраические суммы ординат которых определяют напряжение и ток, затухающие вдоль линии. Надо показать основные характеристики однородной линии постоянного тока — волновое сопротивление $\rho = \sqrt{\frac{r}{g}}$ и коэффициент распространения $\alpha = \sqrt{rg}$, определяющий интенсивность затухания.

Эти результаты следует использовать для получения сразу решения для режима синусоидального напряжения, заменив на единицу длины продольное сопротивление r комплексным сопротивлением $r + j\omega L$, а поперечную проводимость g комплексной проводимостью $g + j\omega C$. Тогда характеристиками линии будет волновое сопротивление Z и коэффициент распространения γ :

$$Z = \sqrt{\frac{r + j\omega L}{g + j\omega C}} \quad \text{и} \quad \gamma = \sqrt{(r + j\omega L)(g + j\omega C)} = \alpha + j\beta,$$

где α — коэффициент затухания, а β — коэффициент фазы.

Полученные выражения для U и I в каждой точке линии преобразуются с использованием гиперболических функций, и подчеркивается их аналогия с уравнениями для однородных симметричных цепных схем. Определяются параметры четырехполюсника, эквивалентного линии в целом.

Из уравнений линии видна зависимость напряжения и тока в любой ее точке от частоты, что в случае сложной формы кривых напряжения и тока, имеющих место в линиях связи, вызывает нежелательные искажения. Поэтому следует определить соотношения параметров *неискажающей линии*, коэффициент затухания и волновое сопротивление которой не зависят от частоты.

Необходимо также показать, что при синусоидальном режиме мгновенные значения напряжения и тока в линии могут быть представлены как наложение *прямой* (падающей) и *обратной* (отраженной) волн, бегущих со скоростью, равной для неискажающей линии скорости света, и затухающих при своем движении. Определяется длина волны, по величине обратная частоте, и показывается, что длина современных воздушных линий, передающих энергию при $f = 50$ Гц, меньше четверти длины волны, тогда как в

телефонных линиях связи могут уложиться несколько волн, а линии, применяемые в радиоаппаратуре при высоких частотах, имеют длину, во много раз большую длины волны. Надо доказать, что в кабельных линиях скорость и длина волны будут примерно вдвое меньше.

Надо также показать, что при сопротивлении нагрузки, равном волновому, обратная волна отсутствует; рассмотреть идеальные случаи линии без потерь, когда распределения напряжения и тока вдоль линии представляют собой *стоячие волны*. Указав, что разложение напряжения и тока на прямую и обратную волны является лишь расчетным приемом, а в действительности в каждой точке линии в каждый момент времени существуют одно напряжение и один ток, следует показать распределение их действующих значений вдоль линии, длина которой больше длины волны.

Для анализа переходных процессов из той же системы двух уравнений для мгновенных значений u и i исключают одну из этих величин, например ток, и получают дифференциальное уравнение в частных производных второго порядка относительно напряжения, общее решение которого крайне сложно. Поэтому приходится ограничиться частным случаем, например неискажающей линией; в этом случае напряжение вдоль линии изменяется в зависимости от места и времени следующим образом:

$$u = [f_A(x + vt) + f_B(x - vt)]e^{-at},$$

после чего определяется ток:

$$i = \frac{1}{\rho} [f_A(x + vt) - f_B(x - vt)]e^{-at},$$

где скорость $v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, $a = \frac{r}{L} = \frac{g}{C}$, $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ —

волновое сопротивление. Конкретный вид функций f_A и f_B определяется условиями задачи.

Следует указать на возможность расчета переходных процессов в однородных линиях также операторным методом, при котором переход от мгновенных значений $u(t)$ и $i(t)$ к их операторным изображениям $U(p, x)$ и $I(p, x)$ превращает уравнение в частных производных в обыкновенные дифференциальные уравнения. После их решения для перехода к оригиналу можно применить обратное преобразование Лапласа. Затем показывается, что выведенные выражения представляют напряжение и ток линии также в виде наложения прямой (падающей) и обратной (отраженной) волн, бегущих со скоростью v — сначала для линии без потерь, затем при их наличии, когда волны затухают по мере их движения. Надо показать, что при сопротивлении приемника, равного волновому сопротивлению, обратные волны не возникают, а у разомкнутой и короткозамкнутой линии отраженные волны имеют ту же величину, что и падающие, изменяя знак в разомкнутой линии — у волны тока, в короткозамкнутой — у волны напряжения.

Приступая к изучению процессов включения линии, надо показать, что для линии, длина которой много меньше длины волны $\lambda = \frac{v}{f}$, волны за время начальной стадии переходного процесса будут аналогичными при включении на постоянное и синусоидальное напряжения. Надо рассмотреть включения на постоянное напряжение линии без потерь, разомкнутой на конце, нагруженной активным сопротивлением и замкнутой накоротко, показав, как движутся и отражаются от конца и от начала линии волны напряжения и тока. Надо указать, что в линии с потерями эти волны постепенно затухают.

16. Лекционные демонстрации

Демонстрации по разделу переменных токов должны иллюстрировать теоретические выводы, причем процессы наблюдаются с помощью демонстрационного осциллографа, обычных приборов — амперметров, вольтметров, ваттметров и т. д., но большого размера, и «измерителя векторов», представляющего собой наглядно смонтированный комплексный компенсатор, например, питаемый от однофазного ротора трехфазного фазорегулятора потенциометр. Снимаемое с последнего с помощью движков напряжение должно уравновесить включенное навстречу через нулевой прибор измеряемое напряжение. Это достигается соответствующим положением этих движков и ротора фазорегулятора, что и определяет величину и фазу измеряемого напряжения или пропорционального ему тока.

Компенсатор используется для снятия векторных диаграмм исследуемых схем. Источниками их питания служат генератор переменной частоты и генератор, дающий сложную форму кривой напряжения. Объектом исследования являются следующие установки:

1. Сопротивления, реактивные катушки и конденсаторы, которые с помощью переключателя могут быть соединены в различных комбинациях. Исследуется работа этих цепей, в том числе резонанс напряжений и резонанс токов при синусоидальном и несинусоидальном напряжениях, работа линии передачи и т. п.

2. Две подвижные катушки на общей оси, соединяемые последовательно, параллельно и как трансформатор. Здесь исследуется работа этих схем при разных коэффициентах связи.

3. Три сопротивления, соединяемые в треугольник и звезду без нулевого провода и с ним, и четыре сопротивления, имитирующие линию передачи. Здесь исследуются соединения в звезду и треугольник при разных режимах.

4. Линейные и нелинейные катушки и конденсаторы, соединяемые в различных комбинациях и предназначенные для демонстрации ферро- и сегнеторезонанса и различной нелинейной аппаратуры.

5. Вращающийся коммутатор или реле, осуществляющие периодические переключения и тем самым переходные процессы в цепи с сопротивлением, индуктивностью и емкостью, наблюдаемые с помощью осциллографа.

6. Двухпроводная линия и генератор высокой частоты, позволяющие демонстрировать процессы в длинных линиях.

17. Практические занятия

Как указывалось, задачи, решаемые на упражнениях, должны иллюстрировать основные теоретические положения курса без излишних повторений. Так как решать на упражнениях очень сложные задачи за недостатком времени невозможно, приходится ограничиться задачами средней трудности. На трудные разделы курса — переходные процессы и длинные линии — можно решить лишь ограниченное число задач, так как упражнения неизбежно должны отставать от лекций и на указанные темы остается мало времени. Делу это не вредит, так как изложение этих вопросов на лекциях по существу заключается в решении последовательного ряда задач, например, включение той или иной цепи на постоянное и переменное напряжения.

Можно рекомендовать следующие темы задач.

1. Рассчитать и построить векторную и временную диаграммы полного потока и э. д. с. рамки, вращающейся в однородном магнитном поле.

2. Для цепи с последовательным соединением трех разных э. д. с. аналитически и графически определить сумму двух заданных э. д. с. и третью э. д. с. по заданной сумме всех трех.

3. Для заданных напряжения и активного сопротивления цепи рассчитать и построить временные диаграммы тока, мощности и энергии, определить действующее значение тока и среднюю мощность.

4. Аналогичные задачи для индуктивной и емкостной цепей; добавочно определяется реактивная мощность.

5. По показаниям вольтметра и амперметра при постоянном и переменном токах рассчитать и построить треугольник сопротивлений реактивной катушки.

6. Для заданной цепи с последовательным соединением сопротивления, индуктивности и емкости и заданных напряжения и частоты рассчитать и построить треугольники сопротивлений, напряжений и мощностей.

7. Определить сопротивления и проводимости приемника по его напряжению, току и мощности и построить треугольники напряжений и токов его эквивалентных схем.

8. Методом постепенной замены сложной цепи более простой, ей эквивалентной, рассчитать заданную цепь со смешанным соединением по заданному полному напряжению. Эту же задачу решить методом пропорционального пересчета и символическим методом.

9. Пользуясь символической записью, найти ток в диагонали неуравновешенного моста разными методами: контурных токов, методом эквивалентного генератора, с помощью теоремы взаимности и т. д.

10. По данным опытов холостого хода и короткого замыкания определить параметры четырехполюсника и эквивалентной Т- или П-схемы.

11. По данным опытов холостого хода и короткого замыкания симметричного четырехполюсника, графически и аналитически построить нагрузочный режим.

12. Построить линейную и рабочую диаграммы для цепи с параллельным соединением активного и реактивного сопротивлений при изменении частоты и неизменном напряжении.

13. Построить круговую и рабочую диаграммы для цепи с последовательным соединением активного и реактивного сопротивлений при изменении частоты, но при неизменном напряжении.

14. Рассчитать цепь при последовательном согласном и встречном соединении двух реальных реактивных катушек со взаимной индукцией.

15. Рассчитать напряжения и токи нагруженного воздушного трансформатора по данным опытов холостого хода и короткого замыкания.

16. Рассчитать последовательно-параллельную цепь при взаимной индукции.

17. Рассчитать соединение в треугольник при неодинаковой нагрузке фаз.

18. Рассчитать соединение звездой с нулевым проводом и без него при неодинаковой нагрузке фаз.

19. Рассмотреть соотношения в звезде и треугольнике в предельных случаях, не требующих расчета (холостой ход и короткое замыкание фаз).

20. Рассчитать трехфазную цепь со взаимной индукцией.

21. Рассчитать трехфазную цепь при несимметричной системе напряжений методом симметричных составляющих.

22. Рассчитать мгновенное и действующее значения тока и мощность реальной реактивной катушки при сложной форме кривой приложенного напряжения.

23. Аналогичная задача для цепи с сопротивлением, индуктивностью и емкостью, при заданном напряжении на емкости, содержащем постоянную составляющую.

24. Рассчитать соединение в звезду при одинаковой реактивной нагрузке фаз с нулевым проводом и без него при сложной форме заданного фазного напряжения генератора.

25. По заданной аппроксимации $i(\Psi)$ рассчитать мгновенное и действующее значения тока и эквивалентную индуктивность катушки со сталью при синусоидальном напряжении.

26. Рассчитать классическим методом переходный процесс в индуктивной цепи при изменении ее активного сопротивления для случаев питания постоянным и переменным напряжениями.

27. Рассчитать методами: классическим, наложения (по обоим видам интеграла Дюамеля), спектральным и операторным переходный процесс при включении цепи r, C на импульс напряжения заданной продолжительности: 1) прямоугольной формы и 2) затухающий по экспоненте.

28. Рассчитать операторным методом переходный процесс в цепи со смешанным соединением сопротивления, индуктивности и емкости при включении на постоянное и переменное напряжения.

29. По заданным погонным параметрам однородной линии рассчитать волновое сопротивление, коэффициенты затухания и фазы и скорость распространения волны.

30. Для линии без потерь, нагруженной в конце волновым сопротивлением, при заданном напряжении на конце написать выражения для мгновенных значений напряжения и тока в начале линии и построить эпюру распределения действующих значений напряжения и тока в линии.

31. Для заданной линии без потерь рассмотреть переходный процесс при включении разомкнутой и замкнутой накоротко линии на постоянное напряжение.

18. Лабораторные занятия

Ниже приводится примерный список работ; часть из них должна быть обязательной, остальные выполняются факультативно. Крайне желательно помимо амперметров, вольтметров, ваттметров, фазометров и герцметров ключать в схемы ряда работ магнитоэлектрический или электронный осциллограф, даже если учащиеся еще не изучали их в специальных курсах. Визуальное наблюдение на экранах осциллографов кривых мгновенных значений, их амплитуд и фаз чрезвычайно полезно для уяснения изучаемых процессов. Ниже, в перечне работ, осциллограф упоминается только в тех случаях, когда без него обойтись невозможно.

1. Исследование реактивной катушки без сердечника при изменении величины напряжения, частоты и числа витков.

2. Исследование батареи конденсаторов при изменении величины напряжения, частоты и схемы соединения.

3. Последовательное и параллельное соединения с проверкой закона сложения параметров при этих соединениях.

4. Исследование резонанса напряжений при изменении параметров или частоты при неизменном напряжении или токе.

5. Исследование резонанса токов аналогично предыдущему и решение задачи повышения коэффициента мощности.

6. Исследование схем прямого и обратного преобразования неизменного напряжения в неизменный ток.

7. Исследование пассивного четырехполюсника и сравнение результатов с расчетом, основанным на измеренных параметрах; проверка метода холостого хода и короткого замыкания для получения нагрузочного режима.

8. Передача энергии к приемнику с постоянным коэффициентом мощности и сравнение результатов опытов с расчетными, полученными на основе построенной круговой диаграммы.

9. Исследование цепей со взаимной индукцией при последовательном и параллельном соединениях, а также воздушного трансформатора при переменном коэффициенте связи.

10. Исследование резонанса в двух связанных цепях, состоящее из вычисления и подбора параметров схемы и снятия частотных характеристик цепей.

11. Исследование соединения в треугольник при различных нагрузках с построением векторных диаграмм.

12. Исследование соединения в звезду аналогично предыдущему при наличии и отсутствии нулевого провода.

13. Разложение несимметричной трехфазной системы на симметричные составляющие, расчет фильтров последовательностей, измерение составляющих и сравнение практических результатов с расчетом.

14. Осциллографическое исследование при сложной форме кривых напряжения и тока линейных и нелинейных цепей с сопротивлением, индуктивностью и емкостью, а также резонанса напряжений на основной и высших гармониках.

15. Расчет и с помощью осциллографа исследование электрических фильтров Г-образного и резонансных.

16. Исследование реактивной катушки со сплошными и проводочными медными и стальными сердечниками в функции напряжения, индукции и частоты и катушки с раздвижным стальным сердечником.

17. Осциллографическое исследование высших гармоник напряжений и токов в трехфазных системах, источниками гармоник в которых являются: 1) генератор и 2) нелинейный приемник.

18. Исследование феррорезонанса в нелинейных цепях и сравнение опытных кривых с построенными на основе характеристик элементов цепи.

19. Осциллографическое исследование ферромагнитного удвоителя частоты и сравнение его результатов с расчетом.

20. Исследование простейших схем ферромагнитных усилителей мощности и построение их характеристик.

21. Исследование ферромагнитного стабилизатора напряжения и сравнение результатов опытного исследования с расчетными построениями на основе характеристик его элементов.

22. Исследование переходных процессов с помощью осциллографа с синхронно работающим переключателем, позволяющим периодически повторять исследуемые переходные процессы в цепях со сосредоточенными параметрами для наблюдения их на экране осциллографа.

23. Исследование автоколебательной цепи с конденсатором и газоразрядной лампой, причем результаты опытов сравниваются с расчетами на основе характеристик элементов.

24. Исследование цепи с распределенными параметрами, питаемой от генератора звуковой частоты, при различных установившихся режимах ее работы.

19. Домашние задания и курсовая работа

Выполнение заданий должно закрепить основы курса. Вместе с тем не следует давать заданий в конце чтения курса, так как тогда усилия студентов должны быть уже направлены на подготовку к экзамену. Поэтому приходится ограничиваться тематикой примерно первых двух третей курса и рекомендовать следующие темы для заданий:

1. Для цепи, состоящей из последовательного соединения r , L и C , по заданному напряжению и частоте рассчитать и построить временные и векторные диаграммы для тока, напряжений и мощностей всех участков, а также построить частотные характеристики.

2. Для цепи, представляющей собой несимметричную трехпроводную линию и приемник, соединенный треугольником с неодинаковой нагрузкой фаз, по заданным линейным напряжениям рассчитать символическим методом и построить векторную диаграмму напряжений и токов всех участков цепи, а также вычислить мощности и к. п. д. линии передачи.

3. Для цепи, состоящей из конденсатора, последовательно соединенного с параллельным разветвлением катушки, и активного сопротивления, при напряжении, заданном графически, с помощью разложения последнего в ряд Фурье вычислить мгновенные и действующие значения напряжений и токов всех участков цепи, а также среднюю мощность.

4. Расчет одного и того же переходного процесса классическим, наложения, операторным и спектральным методами в одной и той же цепи со сосредоточенными параметрами.

Тема курсовой работы, задаваемой взамен домашних заданий по цепям переменного тока, рекомендована в п. 4 гл. VI.

В теории электромагнитного поля (ТЭМП) — наиболее трудной части курса ТОЭ — особенно важно выдержать принципы «от простого к сложному» и «от известного к неизвестному», связывая новый материал с изученным ранее и по возможности сокращая его объем, что позволит осветить также новые перспективные темы. С этих точек зрения рекомендуемое содержание и построение этой последней части курса было обосновано в п. 7е, гл. VII. Основными особенностями предложенной методики являются анализ полей не по их виду, а по типу их уравнений, рассмотрение движения энергии сначала в постоянном электромагнитном поле, изложение излучения волн ранее их распространения, а также перспективные темы — электромагнитное экранирование, переходные процессы в полях, электромагнитное поле в движущихся средах с основами магнитогидродинамики. Далее новые темы рассмотрены более подробно.

1. Уравнения постоянных электрических и магнитных полей

Сначала дается краткий исторический обзор развития ТЭМП, приведшего к представлению об электромагнитном поле, как об одной из форм материи. Подчеркивается, что материальность электромагнитного поля подтверждается существованием у него массы и энергии, неразрывно связанных друг с другом. Приводится известное из курса физики явление давления света на освещаемую поверхность, подтверждающее существование массы электромагнитного поля. Указывается, что в электромагнитных полях, используемых в настоящее время в технике, величина плотности энергии может достигать больших значений и всегда должна учитываться, тогда как плотность массы электромагнитных полей весьма мала по сравнению с плотностью массы вещества. Поэтому масса электромагнитного поля в электротехнических расчетах не учитывается.

Обращается внимание на два способа рассмотрения электромагнитного поля — макроскопическое, используемое в электротехнике, и микроскопическое, обычно применяемое в физике. В пер-

вом способе электромагнитное поле представляется непрерывным, во втором — дискретным, состоящим из фотонов.

На простых примерах иллюстрируется относительность электрического и магнитного полей и их неразрывная связь; подчеркивается условность рассмотрения только одного из этих полей. Здесь же указывается общий метод рассмотрения электромагнитного поля — дифференциальная форма записи основных соотношений — и приводятся примеры технических задач, решаемых только методами теории поля; тем самым подчеркивается практическая необходимость изучения ТЭМП. Указывается, что для математического описания явлений используется адекватный ТЭМП векторный анализ, часто называемый математической теорией поля.

Затем выводятся полные системы уравнений в дифференциальной форме для всех видов статических полей. Сначала дается вывод уравнений вихрей и истоков для электрического поля неподвижных электрических зарядов в диэлектрике путем перехода от интегральной формы:

$$\oint \mathbf{E} d\mathbf{l} = 0 \rightarrow \operatorname{rot} \mathbf{E} = 0;$$

$$\oint \mathbf{D} d\mathbf{S} = Q \rightarrow \operatorname{div} \mathbf{D} = \rho.$$

Из уравнения $\operatorname{rot} \mathbf{E} = 0$ следует зависимость для электрического потенциала φ :

$$\mathbf{E} = -\operatorname{grad} \varphi,$$

а из уравнений $\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho$ и $\operatorname{div} \mathbf{D} = 0$ для электрического поля в однородном диэлектрике следуют соответственно *уравнения Пуассона и Лапласа*:

$$\Delta \varphi = -\frac{\rho}{\epsilon} \text{ и } \Delta \varphi = 0;$$

здесь Δ — оператор Лапласа.

Показывается, что для электрического поля общим решением уравнения Пуассона является

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_V \frac{\rho}{r} dV,$$

где r — расстояние до объема dV с зарядом ρdV .

Указывается, что электрическое поле в диэлектрике, созданное движущимися электрическими зарядами (токами в проводниках), удовлетворяет тем же уравнениям, что и электростатическое поле в диэлектрике, в пространстве, не занятом зарядами ($\rho = 0$). Единственное различие в том, что в электростатическом поле поверхности проводников являются эквипотенциальными поверхностями, а поверхности проводников с токами — нет. Это положение полезно проиллюстрировать простой картиной поля, например, полем двухпроводной линии.

По аналогии выводится подобная система уравнений для электрического поля в проводящей среде, а также закон Джоуля — Ленца в дифференциальной форме:

$$\oint \mathbf{E} d\mathbf{l} = 0 \rightarrow \operatorname{rot} \mathbf{E} = 0; \quad \oint \boldsymbol{\delta} d\mathbf{S} = 0 \rightarrow \operatorname{div} \boldsymbol{\delta} = 0;$$

$$\mathbf{E} = -\operatorname{grad} \varphi; \quad \Delta \varphi = 0; \quad P_0 = \boldsymbol{\delta} \mathbf{E},$$

и для магнитного поля вис токов и постоянных магнитов:

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = 0 \rightarrow \operatorname{rot} \mathbf{H} = \boldsymbol{\delta}; \quad \oint \mathbf{B} d\mathbf{S} = 0 \rightarrow \operatorname{div} \mathbf{B} = 0;$$

$$\mathbf{H} = -\operatorname{grad} \varphi_m; \quad \Delta \varphi_m = 0.$$

Переходя к расчету магнитного поля в области, занятой токами, на основе уравнения $\operatorname{rot} \mathbf{H} = \boldsymbol{\delta}$ вводят векторный магнитный потенциал \mathbf{A} из соотношения

$$\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A}.$$

Затем получают уравнение Пуассона

$$\Delta \mathbf{A} = -\mu \boldsymbol{\delta};$$

следовательно, его решение

$$\mathbf{A} = \frac{\mu}{4\pi} \int \frac{\boldsymbol{\delta} dV}{r}.$$

Если токи протекают по тонким линейным проводникам, это решение приводится к виду

$$\mathbf{A} = \frac{\mu}{4\pi} \oint \frac{I d\mathbf{l}}{r}.$$

Показывают, что магнитный поток в общем случае

$$\Phi = \oint \mathbf{A} d\mathbf{l}.$$

Рекомендуется показать на плакате табл. 21.1 из учебника [3], в которой сведены уравнения для различных полей, и устанавливается подобие и различие между аналогичными уравнениями. Из этой таблицы также видна независимость друг от друга уравнений постоянных электрических и магнитных полей, что подтверждает целесообразность их раздельного изучения.

2. Расчет постоянных полей по уравнению Лапласа. Моделирование полей

Предварительно надо указать, что для расчета постоянных полей, обладающих плоской, осевой или сферической симметрией, можно применять теорему Гаусса и закон полного тока в интегральной форме. При более сложных полях приходится обращаться к уравнениям в дифференциальной форме, приведенным выше и

в указанной таблице, откуда можно определить соответственно **E**, **δ**, **H**, как функции координат. Указывается на принципиальную возможность переноса результатов расчета одного поля на подобную задачу для другого поля при аналогичных граничных условиях для соответствующих векторов и одинаковом распределении ϵ , γ и μ .

Расчет поля упрощается, если среда однородна; к упрощению математических вычислений приводит также введение потенциала, так как при этом три уравнения для составляющих векторов сводятся к одному уравнению для скаляра. Подчеркивается удобство графического изображения полей, особенно для часто встречающихся на практике плоскопараллельных и плоскомеридианных полей. Указывается на необходимость выбора координатной системы при решении уравнений поля таким образом, чтобы граничные поверхности задачи совпадали с координатными поверхностями или, по крайней мере, были близки к ним.

Затем доказывается теорема единственности решения уравнения Лапласа. Приводимое обычно возражение против изложения доказательства этой теоремы из-за ее малой познавательной ценности и желания сократить объем учебника нельзя признать состоятельным, так как она дает обоснование различных методов расчета поля.

Подчеркивается аналогичность результатов расчета различных полей при подобии граничных эквипотенциальных поверхностей, так как при этом поля подобны.

Сначала для случая плоскопараллельного, т. е. двухмерного поля, излагается предложенный Фурье метод разделения переменных для перехода от уравнения в частных производных к двум обыкновенным дифференциальным уравнениям и указывается на возможность распространения метода Фурье на трехмерное поле и на любую систему координат. В качестве примера рассматривается проводящий цилиндр в другой проводящей среде и в однородном электрическом поле; обобщается решение на аналогичные задачи электростатического и магнитного полей. Развитием этого примера может служить цилиндрический магнитный экран в однородном внешнем поле.

Здесь же целесообразно рассмотреть моделирование полей электрическим полем в проводящей среде: двухмерного — *методом проводящего листа* и трехмерного — *методом электролитической ванны*. Необходимо подчеркнуть простоту и доступность метода проводящего листа, позволяющего быстро изготовить модель и снять картину поля. Важно, что этими методами можно моделировать не только электрические и магнитные поля, но и другие физические поля, например тепловые, гидродинамические и др. Указать, что по снятой экспериментально картине поля можно определить не только значение напряженности поля в каждой точке моделируемого устройства, но и такие характеристики, как индуктивность, емкость, сопротивление (электрическое и магнитное).

3. Расчет постоянных полей по уравнению Пуассона

Подчеркивается, что этим уравнением необходимо пользоваться для расчета полей в случаях, когда задано распределение плотности зарядов или токов, а также указывается, что решение обратной задачи, т. е. расчета распределения плотностей зарядов или токов по заданной конфигурации поля, не представляет особых затруднений. Надо показать при этом различие в расчетах электрических и магнитных полей, состоящее в том, что в первом случае в уравнение входит скалярный потенциал ϕ , откуда напряженность поля $\mathbf{E} = -\text{grad } \phi$, во втором — векторный потенциал \mathbf{A} , откуда магнитная индукция $\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}$. Вместе с тем надо показать, что для плоскопараллельных электрических и магнитных полей существует сходство между уравнениями и их решениями. При этом возникает «обратное» соответствие между величинами, характеризующими электрическое и магнитное поля, по сравнению с «прямым» соответствием этих величин для полей, описываемых уравнением Лапласа. Например, напряженности E электрического поля соответствует по уравнениям Лапласа напряженность H магнитного поля, а по уравнениям Пуассона вектору \mathbf{E} — вектор магнитной индукции \mathbf{B} .

В виде примеров решается задача расчета электрического поля в пространстве, занятом объемным зарядом, распределенным с плотностью, пропорциональной только радиусу, а также задача расчета магнитного поля постоянного тока, протекающего в цилиндрическом проводе вдоль его оси при плотности тока, пропорциональной только радиусу. На этих задачах подтверждается обратное соответствие картин плоскопараллельных электрических и магнитных полей. Представляет также большой практический интерес расчет электрического поля и тока в вакуумной лампе с использованием уравнения Пуассона и расчет магнитного поля двухпроводной линии из проводов прямоугольного сечения.

4. Расчет постоянных полей по уравнениям Максвелла

Общий случай расчета полей по уравнениям Максвелла, т. е. по вихрям и истокам, весьма затруднителен, так как требуется найти три составляющих вектора \mathbf{E} , или δ , или \mathbf{H} . Расчет упрощается, если с помощью выбора системы координат задачу удастся свести к случаю, когда искомый вектор зависит лишь от одной координаты. В качестве примера можно рассмотреть расчет электрического поля на основе зависимости $\text{div } \mathbf{D} = 0$ в плоском конденсаторе, диэлектрическая проницаемость диэлектрика которого пропорциональна расстоянию до обкладки, с вычислением емкости конденсатора. Выбор прямоугольной системы координат позволяет свести задачу к упомянутому простому случаю.

Решение этой задачи переносится на аналогичную задачу расчета тока и сопротивления утечки конденсатора, а также магнитной проводимости слоя, магнитная проницаемость которого изменяется аналогично. Интересен расчет поля того же конденсатора, но с постоянной проводимостью идеального диэлектрика.

Вторым примером может служить расчет на основе зависимости $\operatorname{rot} \mathbf{H} = \delta$ магнитного поля постоянного тока неизменной плотности ($\delta = \text{const}$), протекающего по цилиндрической ферромагнитной трубе вдоль ее оси, причем магнитная проницаемость материала трубы пропорциональна ее радиусу, а также аналогичная задача расчета электрического поля заряженной трубы.

Следует указать, что общие уравнения вихрей и истоков приходится применять для расчета полей в неоднородных средах, когда другие методы непригодны.

5. Расчет постоянных полей методом зеркальных изображений

Прежде всего необходимо дать обоснование этого метода на базе теоремы единственности решения уравнения Лапласа. Далее целесообразно последовательно рассмотреть типовые задачи: точечный заряд и плоская поверхность проводящей среды, точечный заряд и плоская поверхность раздела двух диэлектриков, линейный заряд вблизи поверхностей раздела диэлектрик — проводник и диэлектрик — диэлектрик, а также линейные токи вблизи плоских поверхностей раздела сред.

Надо подчеркнуть, что метод зеркальных изображений применим не только для плоских поверхностей раздела сред, но и для сферических и цилиндрических поверхностей.

6. Расчет постоянных полей методом конформных преобразований

Вначале следует указать, что метод конформных преобразований применим для расчета плоскопараллельных полей, удовлетворяющих уравнению Лапласа. Подчеркнуть, что в основе этого метода лежит преобразование, с помощью функций комплексного переменного, поля сложной конфигурации в поле простой конфигурации. Показать, что в аналитических функциях комплексного переменного вещественная и мнимая части удовлетворяют уравнению Лапласа. Затем вводят комплексный потенциал и показывают, как определяется через него напряженность поля. Необходимо подчеркнуть, что нет общего метода нахождения комплексного потенциала для любых конфигураций граничных линий.

В качестве примеров следует разобрать электрическое поле двух плоскостей, сходящихся под углом, электрическое поле между двумя пластинами. На основе последнего примера указать, что с по-

мощью комплексного потенциала в виде гиперболического арккосинуса можно рассчитать ряд важных для практики электрических и магнитных полей, у которых эквипотенциальные или силовые линии имеют вид эллипсов или гипербол.

7. Методы расчета емкостей и индуктивностей

Здесь приводятся три формы записи уравнений Максвелла, связывающих между собой заряды, потенциалы и напряжения в системе тел, даются определения коэффициентов — потенциальных и электростатической индукции, частичных емкостей и связь между ними. В виде примера целесообразно дать расчет частичных емкостей для трехпроводной линии с учетом земли.

Затем излагается приближенный метод средних потенциалов (метод Хоу), основанный на замене истинного распределения заряда на поверхности тела при неизменном значении потенциала тела — некоторой плотностью заряда, но при потенциале, меняющемся от точки к точке. Эта физически неверная картина упрощает расчет емкости путем введения некоторого среднего потенциала. Следует подчеркнуть, что метод даёт удовлетворительный результат, когда распределение плотности заряда по поверхности тела мало отличается от постоянного. В качестве примера следует рассмотреть задачу определения емкости уединенного прямого провода с длиной, большей его диаметра.

Затем излагаются различные методы расчета индуктивностей и взаимоиндуктивностей. При этом используется «соответствие» между электрическими и магнитными величинами для плоскопараллельных полей, отмеченное выше (п.п. 2 и 3), и позволяющее во многих случаях сразу написать выражение для индуктивности по ранее найденной емкости той же системы тел.

В заключение излагается метод отрезков расчета индуктивности; при этом отмечается его ограниченность: он пригоден лишь для контуров, состоящих из «длинных» ($l \gg R$) проводников простой формы. В виде примера целесообразно рассчитать индуктивность прямоугольной рамки.

8. Уравнения постоянного и переменного электромагнитного поля

Сначала надо подчеркнуть, что все процессы преобразования и передачи энергии определяются не отдельно электрическим или магнитным полем, а их совокупностью, т. е. электромагнитным полем, каждая точка которого характеризуется векторами \mathbf{E} и \mathbf{H} . Переход к общим уравнениям поля предваряется рассмотрением постоянного электромагнитного поля с введением для него вектора Пойнтинга. Это удобно сделать на примере коак-

сиального кабеля, в котором поле заключено в его объеме — сначала для идеализированного коаксиального кабеля без сопротивления и без утечки в изоляции. Если внутренний радиус r_1 его оболочки мало отличается от внешнего радиуса r_2 внутренней жилы, поле в изоляции можно считать однородным; тогда

$$E = \frac{U}{r_1 - r_2}; \quad H = \frac{I}{2\pi r_{\text{ср}}} = \frac{I}{\pi(r_1 + r_2)}$$

Отсюда передаваемая по кабелю мощность

$$P = UI = EH\pi(r_1^2 - r_2^2) = EHS,$$

а мощность на единицу сечения изоляции

$$\frac{P}{S} = EH = \Pi,$$

т. е. равна величине вектора Пойнтинга.

Затем с помощью вектора Пойнтинга проводится анализ для реального коаксиального кабеля, т. е. кабеля с неоднородным полем и проводниками, имеющими сопротивление. Показывается, что энергия электромагнитного поля движется от источника к приемнику не по проводникам, а в диэлектрике между жилой и оболочкой кабеля, а также частично теряется в них, преобразуясь в тепло. Таким образом, удастся в доходчивой для учащихся форме наглядно показать существование движения энергии в постоянном электромагнитном поле и физическую сущность вектора Пойнтинга, направление которого совпадает с направлением движения энергии. Здесь следует подчеркнуть, что в любом электромагнитном поле всегда осуществляется движение энергии, определяемое вектором Пойнтинга $\mathbf{\Pi} = [\mathbf{E}\mathbf{H}]$, однако простое наложение электрического и магнитного полей, создаваемых разными источниками, не образует электромагнитного поля — здесь нет движения энергии, хотя формально может быть вычислен вектор Пойнтинга.

Лишь после этого устанавливаются общие уравнения переменного электромагнитного поля в неподвижной среде.

Сначала из известных уравнений поля в интегральной форме

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = i \quad \text{и} \quad \oint \mathbf{E} d\mathbf{l} = -\frac{\partial\Phi}{\partial t}$$

выводится их дифференциальная форма

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad \text{и} \quad \text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

и вместе с уже известными уравнениями поля и аналитически выраженными принципами сохранения заряда и непрерывности тока получается *полная система уравнений электромагнитного поля*. Указывается, что эта система в совокупности с граничными условиями характеризует электромагнитное поле исчерпывающим обра-

зом. Формулируется теорема единственности решения уравнений электромагнитного поля. Следует показать, что закон сохранения заряда и принцип непрерывности полного тока не являются самостоятельными законами, а содержатся в уравнениях Максвелла.

Затем доказывается *теорема Умова — Пойнтинга* для общего случая, когда в рассматриваемом объеме имеются источники, объемные заряды и проводящие тела. Так как понятие вектора Пойнтинга уже введено, доказательство этой теоремы значительно облегчается. Надо указать, что теорема Умова — Пойнтинга является, по существу, законом сохранения энергии в электромагнитном поле.

Напомним об упрощении расчета постоянных полей путем введения скалярного и векторного потенциалов, являющихся функциями координат, вводят упрощающие расчет переменного электромагнитного поля в однородной и изотропной среде электродинамические потенциалы, зависящие и от координат, и от времени. Для них выводится *уравнение Даламбера*, переходящее для постоянных полей в уравнение Пуассона, а для области без зарядов и токов — в волновое уравнение, для постоянных полей обращается в уравнение Лапласа. Затем следует наглядно показать на простом примере поля переменного точечного заряда решение волнового уравнения и вытекающие из него понятия об электромагнитной волне, а также запаздывание изменения электродинамического потенциала по сравнению с изменением заряда.

Переходя к важному для практики случаю изменения поля по синусоидальному закону, надо показать *символическую форму записи уравнений электромагнитного поля*. Используя эту форму, интересно сопоставить изоляционные и проводящие материалы по соотношению токов смещения и проводимости, подчеркнув, что во всех материалах одновременно существуют оба этих тока и что деление материалов на проводящие и изоляционные определяется лишь соотношением токов смещения и проводимости.

9. Излучение электромагнитных волн

Эту тему следует начать с рассмотрения физической картины излучения, связанного с конечной скоростью распространения электромагнитных волн, зависимости его от частоты и конфигурации излучающего контура и упомянуть о работах Максвелла, Герца и А. С. Попова. Затем дается математическое описание в сферической системе координат явления излучения на примере элементарного излучателя — *электрического диполя Герца* с использованием скалярного и векторного потенциалов.

Подчеркивается, что в отличие от постоянного поля в переменном электромагнитном поле напряженность магнитного поля определяется не только током, но и его производной по времени, а напряженность электрического поля — не только зарядом, но и током и его производной по времени. На основе полученных выражений

для напряженностей электрического и магнитного полей дается определение сферической волны.

Затем делаются выводы для соотношения напряженностей поля E и H и для вектора Пойнтинга в ближней и дальней зонах. Подчеркивается различный закон изменения вектора Пойнтинга в этих зонах — в ближней он обратно пропорционален пятой степени расстояния, в дальней — второй, и соответственно реактивный и активный характер поля в этих зонах. На основе полученных выражений для напряженностей поля строится диаграмма направленности и подчеркивается ее значение для характеристики различных антенн. По найденному выражению вектора Пойнтинга вычисляется средняя мощность излучения и вводится понятие сопротивления излучения, характеризующего способность диполя к излучению. Полученные выражения используются для простой длинноволновой антенны. Показывается, что в такой антенне излучает практически лишь вертикальный провод, а горизонтальные провода служат только для увеличения емкости антенны.

Затем рассматривается излучение магнитного диполя — рамки с синусоидальным током. Записывается выражение магнитного момента рамки $p_m = \mu i \omega s$ (ω — число витков, s — площадь рамки) и обосновывается принцип двойственности, заключенный в уравнениях Максвелла и позволяющий перейти от электромагнитного поля электрического диполя к полю магнитного диполя заменой E на H и ϵ на $-\mu$.

В заключение следует показать, почему в реально осуществленных дальних линиях передачи переменного тока можно пренебречь излучением.

10. Распространение электромагнитных волн

Сначала рассматривается плоская волна в однородной диэлектрике в общем виде для любого периодического закона изменения E и H без постоянной составляющей. На основе уравнений Максвелла доказываются существование падающей и отраженной волн, соотношение их энергий, конечная скорость распространения волны и энергии, связь и взаимоперпендикулярность векторов E и H , а для синусоидального закона — их синфазность. Затем рассматривается прохождение плоской волны через нормально к ней расположенную поверхность раздела и возникновение преломленной и отраженной волн.

Аналогичным образом рассматривается плоская волна в проводящей среде и устанавливаются ее особенности: другая связь между E и H , затухание, зависимость длины и скорости от частоты и параметров среды и свои законы преломления и отражения у поверхности раздела диэлектрической и проводящей сред. Показывается, что от поверхности сверхпроводящей среды падающая волна, полностью отражаясь, не проникает в сверхпроводник, хотя на поверхности сверхпроводника амплитуда преломленной волны вдвое больше амплитуды падающей.

Изложение вопросов распространения плоской электромагнитной волны в диэлектрике и в проводящей среде целесообразно связать с теорией длинных линий, используя аналогию соответствующих дифференциальных уравнений.

В заключение этой темы рассматривается общий случай — плоская волна в полупроводящей среде, когда одновременно учитываются токи проводимости и токи смещения. Здесь показывается, как введением комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей учитываются потери энергии при поляризации диэлектрика и намагничивании магнетика.

11. Поверхностный эффект

Весьма важное для электро- и радиотехники явление поверхностного эффекта излагается с общей позиции электромагнитного поля — затухании его в проводящей среде. Указав, что для уменьшения потерь на вихревые токи и для более равномерного распределения магнитного потока по сечению магнитопроводы собираются из отдельных листов, рассматривают неравномерное распределение переменного магнитного потока в плоском листе. Затем решается задача неравномерного распределения переменного тока в проводе кругового сечения и вычисляется его активное и внутреннее реактивное сопротивление. Указываются меры по уменьшению поверхностного эффекта в многожильных проводах большого сечения.

Кроме того, на примере двух параллельных шин излагается имеющий большое значение в электротехнике эффект близости. Подчеркивается роль эффекта близости для индукционного поверхностного нагрева и указывается на отсутствие эффекта близости при постоянном токе.

12. Электромагнитное экранирование

Здесь надо рассмотреть электромагнитные металлические экраны, защищающие электрические устройства, например электроизмерительные приборы, от помехоносущего переменного электромагнитного поля. Из двух возможных способов экранирования — внутри экрана помещают или защищаемый объект или источник помех — достаточно ограничиться анализом первого. Теория такого экрана рассматривается с общей позиции — затухания электромагнитного поля. В качестве примера исследуется цилиндрический экран в однородном магнитном поле, перпендикулярном к оси экрана, причем надо выполнить расчет поля вне экрана, в его стенке и полости. При этом используется аналогия формул расчета цилиндрического экрана для постоянного магнитного поля, упомянутого в п. 2 этой главы. По результатам расчета надо определить коэффициенты экранирования и обратного действия экрана и подчеркнуть, что при однородном первоначальном поле ослаблен-

ное поле в полости экрана будет также однородным. Надлежит исследовать полученные результаты в функции частоты и магнитной проницаемости материала экрана и показать, что электромагнитное экранирование, обусловленное затуханием электромагнитного поля, при $\omega=0$ и $\mu > \mu_0$ переходит в магнитное, определяющееся преимущественным прохождением постоянного магнитного потока в толще экрана.

13. Переходные процессы в электромагнитном поле

Прежде всего необходимо подчеркнуть практическую важность этих вопросов в связи с развитием импульсной техники — в радиолокации, телевидении, многоканальной связи, радионавигации, электронных вычислительных машинах. Указывается, что для расчета переходных процессов в электромагнитном поле применимы те же методы, что и для электрических цепей — классический, наложения, спектральный и операторный. В отличие от электрических цепей, где токи и напряжения зависят только от одной переменной — времени, что приводит к решению обыкновенных дифференциальных уравнений, в электромагнитном поле искомые величины являются функциями координат и времени и им соответствуют дифференциальные уравнения в частных производных.

На примерах установления магнитного потока в пластине и тока в проводе кругового сечения классическим методом получают аналитические выражения и строят графики, описывающие эти процессы.

Помимо большой важности этих двух примеров для электротехники, они полезны с методической точки зрения — приходится решать похожие уравнения в частных производных для первой и второй задачи:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = \gamma \mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad \text{и} \quad \frac{\partial^2 \delta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \delta}{\partial r} = \gamma \mu \frac{\partial \delta}{\partial t},$$

но второе уравнение содержит добавочный член с первой частной производной искомой величины по геометрической координате, что усложняет его решение. Если позволяет время, следует решить задачу (хотя бы одну из рассмотренных) другим методом — например, операторным.

14. Электромагнитное поле в движущихся средах и основы магнитогидродинамики

В современной технике все больший интерес приобретают устройства с электромагнитным полем в движущейся среде, например, магнитогидродинамические машины, плазматроны, различного

вида ускорители плазмы, устройства для исследования термоядерного процесса, ряд установок электронно-ионной технологии и т. п.

Основная задача магнитогидродинамики — расчет движения проводящей среды во внешнем магнитном поле, которое индуцирует в среде токи, создающие дополнительное магнитное поле. Взаимодействие этих токов с результирующим магнитным полем определяет специфический характер движения среды. Поэтому сперва в самом общем виде следует показать учет движения среды в уравнениях Максвелла путем замены частных производных по времени полными, что приводит от уравнений

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad \text{и} \quad \operatorname{rot} \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

к уравнениям

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{d\mathbf{D}}{dt} \quad \text{и} \quad \operatorname{rot} \mathbf{E} = - \frac{d\mathbf{B}}{dt} .$$

Затем, используя известное из векторного анализа соотношение для любого вектора \mathbf{A} , находящегося в среде, движущейся со скоростью \mathbf{v} :

$$\frac{d\mathbf{A}}{dt} = \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + (\mathbf{v} \operatorname{grad}) \mathbf{A},$$

выводят уравнения электромагнитного поля в движущихся проводящей и диэлектрической средах. Все эти преобразования осуществляются при условии малой скорости движения среды по сравнению со скоростью света, что позволяет обойтись без привлечения основ теории относительности.

В результате получают уравнения электромагнитного поля в движущейся проводящей среде:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \gamma (\mathbf{E} + [\mathbf{vB}]), \quad \operatorname{rot} \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \operatorname{div} \mathbf{B} = 0$$

и в движущейся диэлектрической среде:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \epsilon \frac{\partial}{\partial t} [\mathbf{vB}] + \rho \mathbf{v},$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \mu \frac{\partial}{\partial t} [\mathbf{vD}];$$

$$\operatorname{div} (\mathbf{D} + \epsilon [\mathbf{vB}]) = 0,$$

$$\operatorname{div} (\mathbf{B} - \mu [\mathbf{vD}]) = 0.$$

Анализируя полученные уравнения, следует обратить внимание студентов на то, что в отличие от электромагнитного поля в неподвижных средах здесь: 1) магнитное поле создается не только током проводимости, током смещения, возникающим из-за изменения во времени вектора смещения, и током переноса, т. е. движением объемного заряда, но и движением намагниченной среды и 2) эле-

трическое поле создается не только изменением во времени вектора магнитной индукции, но и движением поляризованной среды.

Затем подчеркивается техническое значение вопросов магнито-гидродинамики, в первую очередь для прямого преобразования тепловой энергии в электрическую, и выводится путем исключения вектора \mathbf{E} основное уравнение магнитодинамики:

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = \frac{1}{\gamma \mu} \Delta \mathbf{H} + \text{rot}[\mathbf{vH}]. \quad (1)$$

Указываются на значение уравнений гидродинамики: непрерывности, движения (Навье — Стокса), состояния и теплового баланса, образующих вместе с уравнением (1) полную систему уравнений магнито-гидродинамики.

Затем рассматриваются предельные частные случаи — очень медленное движение среды и очень большая проводимость среды, из которых делаются выводы: в первом случае о медленном диффундировании и затухании магнитного поля в проводящей среде; во втором — о «вымороженности» магнитного поля в сверхпроводящую среду. Тут же дается представление о магнито-гидродинамических волнах.

Ввиду особого значения плазмы кратко излагаются ее свойства и эффект сжатия. В заключение приводится и разъясняется принципиальная схема магнито-гидродинамического генератора и двигателя. Следует также указать на возможность создания электро-гидродинамических машин, в которых в электрическом поле движется непроводящая среда.

В заключительной лекции следует обобщить результаты, полученные в курсе. Затем, хотя бы в общих чертах, желательно указать на те практические задачи, сегодня еще не решенные, но решение которых имеет важное значение для техники и возможно лишь методами теории электромагнитного поля. Сюда относятся — углубление и расширение частных методов расчета электромагнитных полей, расчет полей в средах с нелинейными свойствами и полупроводниках, канализация энергии электромагнитного поля (волноводы, передача энергии без проводов, высокочастотный транспорт), расчет полей магнито-гидродинамических и электро-гидродинамических машин постоянного и переменного токов, методы измерения и подавления различного рода помех в электромагнитном поле, возможное использование инерции электромагнитного поля, разработка методов экспериментального исследования и моделирования полей, электродинамика сверхпроводников.

Лекционные демонстрации по этой части курса не предусматриваются в виду сложности рассматриваемых явлений и трудности их наглядного и краткого показа. Студенты сами изучают на опыте эти явления в лаборатории, где время, отводимое на каждую работу, достаточно велико и они могут проверить основные явления теории электромагнитного поля.

15. Практические занятия

Задачи, решаемые на практических занятиях по теории электромагнитного поля, ни в коем случае не должны сводиться к подстановке численных значений в выведенные на лекциях формулы.

По существу, эти задачи, базируясь на сведениях, полученных студентами на лекциях, должны представлять собой вариации граничных условий по сравнению с рассмотренными на этих лекциях. Это означает, что студенты, изучив различные методы расчета полей, должны научиться на практических занятиях выбирать метод решения данной задачи и систему координат, наиболее подходящие для нее, составлять дифференциальное уравнение и решать его в соответствии с граничными условиями. При решении задач на тот или иной вид поля следует также рассмотреть, как должна быть составлена и решена аналогичная задача для других видов полей.

Ниже приводятся рекомендуемые темы задач:

1. Расчет (в векторной форме) поля электрического диполя.
2. Расчет поля заряженного эллипсоида вращения и прямого провода конечной длины.
3. Расчет электрического поля коаксиального кабеля с неоднородным диэлектриком; диэлектрическая проницаемость задана как функция радиуса.
4. Расчет поля плоского конденсатора с постоянной объемной плотностью заряда.
5. Расчет поля и определение закона распределения поверхностной плотности заряда двух плоскостей, образующих двугранный угол.
6. Расчет поля точечного заряда, помещенного вблизи плоской границы раздела двух диэлектриков.
7. Расчет поля тока между плоскими электродами в неоднородной проводящей среде.
8. Расчет поля тока в вакуумной лампе с цилиндрическими электродами.
9. Расчет поля тока заземления в случае плоской границы двух проводящих сред.
10. Расчет поля сферического (или цилиндрического) магнитного экрана, помещенного в однородном поле.
11. Расчет магнитного поля коаксиального кабеля.
12. Расчет поля прямого провода с током, расположенного вблизи плоской поверхности раздела двух сред.
13. Расчет индуктивности многоугольной рамки.
14. Расчет мощности, передаваемой по коаксиальному кабелю.
15. Расчет мощности излучения антенны.
16. Исследование плоской волны в диэлектрике.
17. Исследование проникновения плоской волны в проводящую среду.
18. Расчет плотности тока в проводе при поверхностном эффекте.
19. Расчет электромагнитного экрана.

16. Лабораторные занятия

Работы в лаборатории электромагнитного поля выполняются студентами, уже имеющими знания по первым трем частям курса ТОЭ и опыт работы в лабораториях по этим частям, и поэтому должны быть поставлены на более высоком уровне. Помимо углубления и закрепления знаний, получаемых в теоретическом курсе, они должны прививать студентам навыки самостоятельного научного исследования.

В случае большого времени, отводимого на эти занятия, можно рекомендовать использование руководства Л. Р. Неймана и др. [15], содержащее описание 25 работ. Если времени мало, придется ограничиться выполнением работ по моделированию постоянных двухмерных и трехмерных полей и непосредственному экспериментальному исследованию электрических и магнитных полей. По разделу переменных электромагнитных полей достаточно поставить работы по поверхностному эффекту и электромагнитному экранированию, так как работы по исследованию излучения и распространения электромагнитных волн обычно ставятся в лабораториях радиотехнических кафедр. Если студенты в этих лабораториях не работают, в лаборатории ТЭМП следует поставить хотя бы одну работу по исследованию излучения.

Ниже приводится примерный список этих работ; пособием к ним может также служить руководство [15].

1, 2. Исследование и моделирование плоскостных электрических и магнитных полей с использованием проводящей бумаги; благодаря ее высокому удельному сопротивлению можно применить нулевой метод измерения, пропуская через образец малые токи. Из проводящей бумаги нужно вырезать различные образцы для исследования электрических и магнитных полей и скombинировать листы с различной удельной проводимостью, склеивая их тушью. Электроды выполняются из хорошо проводящего металла.

Исследование заключается в определении серии эквипотенциальных точек и построении эквипотенциальных и силовых линий. По этому методу выполняются две работы: первая — по электрическому, вторая — по магнитному полю.

3. Моделирование трехмерных полей методом электролитической ванны на основании аналогии между электрическим полем в диэлектрике и электрическим полем в проводящей среде.

4. Экспериментальное исследование с помощью феррозонда напряженности земного магнитного поля и поля контуров с токами. Результаты измерений сопоставляются с расчетами исследованных полей.

5. Исследование с помощью датчиков э. д. с. Холла магнитного поля в воздушном зазоре электрической машины, прибора или электромагнита. Результаты измерений сопоставляются с расчетами.

6. Исследование электрического поверхностного эффекта в слоистом цилиндре, состоящем из нескольких изолированных друг от

друга коаксиальных металлических трубок, с измерением величины и фазы тока в каждой трубке векторметром.

7. Исследование магнитного поверхностного эффекта со сравнением распределения магнитного потока по сечению сплошного и наборного магнитопроводов путем использования измерительных обмоток и векторметра.

8. Исследование электромагнитных экранов с определением экранирующего действия различных экранов и их влияния на результирующие параметры экранируемого контура.

9. Исследование электромагнитного поля полуволновой антенны (два горизонтальных стержня на одной линии), эквивалентной на большом расстоянии диполю с переменным зарядом. Результат эксперимента сопоставляется с теорией.

10. Исследование макета магнитогидродинамической машины в режиме генератора и двигателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Никандров Н. Д.* Программированное обучение и идеи кибернетики. М., «Наука», 1970.
2. *Каплянский А. Е., Казарновский Д. М., Квар О. А.* [и др.] Теоретические основы электротехники. Учебное пособие. ЛВИКА им. А. Ф. Можайского Ч. I, 1965, ч. II, 1967.
3. *Каплянский А. Е., Лысенко А. П., Полотовский Л. С.* Теоретические основы электротехники. М., «Высшая школа», 1972.
4. *Гольдин О. Е.* Задачник по теориям электрических цепей. М., «Высшая школа», 1969.
5. Задачник по теоретическим основам электротехники. Под ред. *Поливанова К. М. М.*—Л., «Энергия», 1967.
6. *Говорков В. А., Купальян С. Д.* Теория электромагнитного поля в упражнениях и задачах. М., «Высшая школа», 1970.
7. Практические занятия по теоретическим основам электротехники. Руководство для преподавателей. ЛВИКА им. А. Ф. Можайского, 1957.
8. *Шимони К.* Теоретическая электротехника. М., «Мир», 1964.
9. *Нейман Л. Р., Демирчян К. С.* Теоретические основы электротехники. М.—Л., «Энергия», 1966.
10. *Атабеков Г. И., Купальян С. Д., Тимофеев А. Б., Хухриков С. С.* Теоретические основы электротехники. М.—Л., «Энергия», 1970.
11. *Поливанов К. М., Жуховицкий Б. Я., Негневицкий И. Б.* Теоретические основы электротехники. М., «Энергия». Т. I и II, 1972; т. III, 1969.
12. *Бессонов Л. А.* Теоретические основы электротехники. М., «Высшая школа», 1973.
13. *Ионкин П. А., Мельников Н. А., Даревский А. И., Кухаркин Е. С.* Теоретические основы электротехники. М., «Высшая школа», 1965.
14. *Зевеке Г. В., Ионкин П. А., Нетушил А. В., Страхов С. В.* Основы теории цепей. М., «Энергия», 1965.
15. *Нейман Л. Р., Демирчян К. С., Юрцов В. М.* Руководство к лабораториям электромагнитного поля. М., «Высшая школа», 1966.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	<i>Стр.</i>
Предисловие	3
Введение	5
Глава I. Психолого-педагогические основы преподавания	8
Глава II. О программированном обучении	20
Глава III. Методика чтения лекций	27
Глава IV. Методика проведения практических занятий	40
Глава V. Методика проведения лабораторных занятий	47
Глава VI. Организация работы студентов и ее контроль	56
Глава VII. Содержание и построение курса теоретических основ электро- техники	68
Глава VIII. Частная методика преподавания введения, параметров элект- рических и магнитных цепей и энергетических процессов в них	83
Глава IX. Частная методика преподавания теории электрических и маг- нитных цепей при постоянном токе	88
Глава X. Частная методика преподавания теории электрических цепей при переменном токе	93
Глава XI. Частная методика преподавания теории электромагнитного поля	125
Литература	142

Каплянский Александр Евсеевич

**МЕТОДИКА ПРЕПОДАВАНИЯ
ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ**

Редактор Л. С. Куликова
Обложка художника С. В. Митурича
Художественный редактор Н. Е. Алешинна
Технический редактор Н. В. Яшукова
Корректор М. А. Минкова

Сдано в набор 13/IX—74 г. Подп. к печати 9/VI—75 г.
Формат 60×90¹/₁₆ Бум. тип. № 3. Объем 9 печ л.
(9 усл. п. л.) Уч. изд. л. 9,35 Изд. № УМО—5657
Тираж 9000 экз. Цена 25 коп.
План выпуска литературы издательства «Высшая школа»
(вузы и техникумы) на 1975 г. Позиция № 334.

Москва, К-51, Неглинная ул., д. 29/14,
издательство «Высшая школа»

Московская типография № 8 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли,
Хохловский пер., 7. Зак. 1593.