
ОТ ИЗДАТЕЛЬСТВА

Автор нас тоящей книги — до ктор технических наук, профессор Григорий Иосифович Атабеков (1908–1966), крупный специалист в области электротехники. Преподавал в Закавказском индустриальном институте (1930–1935), в Московском институте механизации и электрификации сельского хозяйства (1935–1942), в Ленинградском институте инженеров свяязи (1942–1945), в Московском авиационном институте им. С. Орджоникидзе (1946–1966). Г. И. Атабековым написан ряд учебников и пособий для студентов высших учебных заведений, обучающихся по электротехническим и радиотехническим специальностям. Эти работы, в том числе данное издание, не потеряли своей актуальности и широко востребованы в настоящее время.

Учебное пособие «Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи» печатается по пятому изданию книги, в которое были внесены некоторые изменения. Книга рецензировалась чл.-кор. АН СССР, проф. К. С. Демирчаном, доцентами В. И. Демиденко и М. А. Шакировым (ЛПИ им. М. И. Калинина).

ПРЕДИСЛОВИЕ К ТРЕТЬЕМУ ИЗДАНИЮ

Настоящий учебник по курсу «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ) предназначен для студентов электромеханических и радиотехнических специальностей, изучающих этот курс с отрывом или без отрыва от производства. Он может также служить руководством для инженерно-технических работников, повышающих уровень теоретических знаний.

Действующая в настоящее время программа курса ТОЭ, утвержденная учебно-методическим управлением по вузам Минвуза СССР в 1964 г. для инженерно-технических специальностей высших учебных заведений, определяет совокупность вопросов, составляющих содержание курса. Курс ТОЭ должен читаться в соответствии с методикой, принятой кафедрой ТОЭ данного вуза, причем в зависимости от имеющихся специальностей и учебных планов института отдельные разделы программы могут излагаться более расширенно или более сжато; очередьность разделов курса может варьироваться. Требуемая степень детализации изложения тех или иных вопросов устанавливается кафедрой ТОЭ по согласованию со специальными кафедрами данного вуза.

Теоретические основы электротехники представляют собой непрерывно развивающуюся и обогащающуюся новыми сведениями дисциплину. По своему содержанию курс ТОЭ разделяется на три явно выраженные части. Первая часть охватывает теорию линейных электрических цепей, вторая — теорию нелинейных цепей и третья — теорию электромагнитного поля. В связи с этим и учебник выпускается в трех частях, каждая из которых содержит соответственную часть курса.

Деление теории цепей по принципу линейности и нелинейности — естественный результат развития современной электротехники и смежных с нею отраслей знаний; оно продиктовано спецификой нелинейных задач и возросшим значением нелинейной электротехники в науке

и технике. В программе курса ТОЭ специально отмечено, что теория нелинейных цепей выделена в самостоятельную часть в связи с исключительно большим значением нелинейных цепей во всех областях современной электротехники и в первую очередь в автоматике, вычислительной технике, радиотехнике, электронике и измерительной технике.

Вместе с тем изучение нелинейных цепей после прохождения теории линейных электрических цепей согласуется и с принципом перехода от простого к сложному: нелинейные задачи, как правило, сложнее линейных и требуют предварительного знания теории линейных электрических цепей.

При решении вопроса о содержании и методике изложения отдельных разделов курса ТОЭ необходимо учитывать современный уровень физико-математической подготовки в средней и высшей школе.

Первоначальные сведения по электричеству, магнетизму и их практическому применению учащиеся средней школы черпают из курсов физики и электротехники. В последующем в высшей школе эти сведения углубляются и расширяются в курсе физики, действующая программа которого для высших технических учебных заведений предусматривает достаточно подробное изучение разделов электростатики, постоянного тока и электромагнетизма. Поэтому при написании настоящего учебника учитывалось, что комплекс знаний в области электричества и магнетизма, приобретенный учащимися до прохождения ТОЭ, вполне достаточен для усвоения первой части ТОЭ — теории линейных электрических цепей.

Устранение излишнего параллелизма и непроизводительной затраты времени на повторение некоторых вопросов, пройденных в средней школе и по курсу физики в институте, дает возможность освободить часть времени в курсе ТОЭ для изучения новых важных вопросов современной теоретической электротехники.

С другой стороны, постановка математического образования в технических вузах с каждым годом все более учитывает необходимость усиления математической подготовки учащихся по соответствующим разделам математического анализа (специальные функции, матрицы, преобразования Фурье и Лапласа, функции комплексного переменного и др.). Это обстоятельство позволяет излагать и изучать курс ТОЭ на должном научно-техническом

уровне с привлечением математического аппарата, который ранее в курсе ТОЭ либо вовсе не использовался, либо давался в дополнительных главах курса ТОЭ, значительно увеличивая его объем (например, теория комплексных чисел, теория вычетов, основы векторного анализа и др.).

Настоящая, первая, часть курса ТОЭ, посвященная линейным электрическим цепям, начинается с краткого напоминания основных физических явлений и законов электрических цепей и основных понятий, относящихся к электрическим и магнитным полям. В начале курса рассматриваются такие основные вопросы, как положительные направления тока и напряжения; элементы и параметры электрической цепи; представление электротехнических устройств идеализированными схемами замещения и т. п.

Читатель постепенно вводится в круг вопросов, относящихся к анализу линейных электрических цепей. Вначале поясняются основные свойства простейших электрических цепей синусоидального тока, векторные диаграммы и комплексная форма расчета. Методика расчета простейших электрических цепей постоянного тока, уже известная учащимся, в учебнике не повторяется.

Последовательно накапливая сведения о преобразованиях электрических схем, резонансных цепях и геометрических местах на комплексной плоскости, учащиеся подготавливаются к сознательному выполнению лабораторных работ и усвоению общих теорем и методов расчета сложных электрических цепей. Последние даются в общей форме, применимой для цепей постоянного и переменного тока.

Вслед за теорией четырехполюсника приводится теория электрических фильтров, рассматриваемых как частные случаи четырехполюсника. Трехфазной цепью завершается изучение синусоидальных режимов в линейных цепях.

Периодические несинусоидальные процессы исследуются с помощью рядов Фурье, а после изучения переходных процессов решения даются и в замкнутой форме.

В главе, посвященной применению преобразования Лапласа, напоминаются основные теоремы и свойства преобразования Лапласа. Главное внимание уделяется не доказательствам формул, которые должны быть известны учащимся из курса высшей математики, а практическому приложению этих формул к расчету переход-

ных процессов в линейных электрических цепях. Рассмотрение преобразования Фурье как частного случая преобразования Лапласа облегчает исследование спектральных характеристик и использование их для расчета переходных процессов.

Первая часть курса завершается ознакомлением с синтезом линейных электрических цепей.

В книге приняты термины, рекомендованные Комитетом технической терминологии АН СССР. Для ознакомления учащихся с определениями терминов, приведенными в сборнике «Терминология теоретической электротехники» (Изд-во АН СССР, 1958, отв. редактор член-корр. АН СССР Л. Р. Нейман), в сносках даны определения основных понятий, заимствованные из этого сборника (сокращенно именуемого ТТЭ) ¹.

Буквенные обозначения в книге приведены в соответствии с ГОСТ 1494-61, а условные графические обозначения для электрических схем — в соответствии с ГОСТ 7624-62 ².

В курсе применена Международная система единиц (СИ) по ГОСТ 9867-61, включающая в себя электрические и магнитные единицы абсолютной практической системы МКСА.

Уделено внимание сочетанию математических выводов с физическими представлениями; изучение методов расчета сопровождается рассмотрением физической стороны явлений, причем содержание материала и порядок его изложения таковы, что учащийся лишь постепенно переходит от более простых вопросов к более сложным.

Для облегчения усвоения курса при заочном обучении основные положения теории иллюстрированы примерами, объем и содержание которых рассчитаны на то, чтобы охватить принципиально важные разделы курса. Кроме того, каждая глава учебника снабжена вопросами для самопроверки и задачами (с ответами), которые учащимся предлагается выполнить самостоятельно.

Студентам, в особенности занимающимся заочно, не всегда удается отличить все принципиальное и наиболее существенное в предмете от менее важного. В связи с этим

¹ В пятом издании терминология была уточнена в соответствии с ГОСТ 19880-74. Электротехника. Основные понятия. Термины и определения. (Прим. ред.)

² В настоящее время ГОСТ 7624-62 заменен системой ГОСТ Единая система конструкторской документации. (Прим. ред.)

при изложении материала в учебнике по мере необходимости оттенены курсивным шрифтом или словесными указаниями принципиальные положения как данного курса, так и последующих дисциплин.

Параграфы и отдельные места, имеющие подчиненное или прикладное значение, набраны петитом.

В третьем издании в книгу внесен ряд исправлений и добавлений (§ 1-5, 1-6, 3-4, 4-3, 5-2, 7-1, 7-10, 8-9—8-11 и др.).

Автор глубоко признателен коллективу кафедры теоретической электротехники Московского ордена Ленина авиационного института имени Серго Орджоникидзе и рецензентам проф. В. Ю. Ломоносову и доц. Л. И. Соловьеву за множество ценных замечаний и советов, способствовавших улучшению книги.

Г. И. АТАБЕКОВ

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- A* — параметр четырехполюсника; обозначение фазы трехфазной цепи;
- a* — собственное затухание четырехполюсника; фазовый оператор e^{j20° ;
- B* — параметр четырехполюсника; обозначение фазы трехфазной цепи; магнитная индукция;
- b* — реактивная проводимость; коэффициент фазы четырехполюсника;
- b_C — емкостная проводимость;
- b_L — индуктивная проводимость;
- C* — емкость; обозначение фазы трехфазной цепи;
- c* — скорость света в пустоте (примерно 3×10^8 м/с); действительная часть комплексной частоты;
- E* — постоянная э. д. с.; действующее значение переменной э. д. с.;
- \dot{E} — комплексная э. д. с.;
- e* — мгновенное значение э. д. с.; основание натуральных логарифмов (примерно 2,718);
- $F(j\omega)$ — спектральная функция;
- $F(p)$ — изображение функции по Лапласу; функция комплексной частоты;
- f* — частота периодической функции;
- G* — параметр четырехполюсника;
- g* — активная проводимость; параметр четырехполюсника (мера или коэффициент передачи);
- H* — параметр четырехполюсника;
- I* — постоянный ток; действующий переменный ток;
- I* — комплексный ток;
- i* — мгновенный ток;
- $j = \sqrt{-1}$;
- K_I — коэффициент передачи по току;
- K_U — коэффициент передачи по напряжению;
- k* — коэффициент связи; постоянная фильтра;
- L* — индуктивность;
- L_S — индуктивность рассеяния;
- M* — взаимная индуктивность;
- m* — постоянная фильтра; индекс, обозначающий амплитуду переменной величины;
- n* — коэффициент трансформации, коэффициент отражения;
- P* — активная мощность;
- p* — мгновенная мощность; комплексная частота;

Q — реактивная мощность; добротность катушки, конденсатора, контура;
 q — электрический заряд (мгновенный);
 r — активное сопротивление;
 S — полная мощность; площадь поперечного сечения;
 T — период;
 t — время;
 U — постоянное напряжение; действующее переменное напряжение;
 \dot{U} — комплексное напряжение;
 u — мгновенное напряжение;
 W — энергия (постоянная);
 w — число витков, мгновенная энергия;
 w_L, w_C — энергия, запасенная в индуктивности и ёмкости;
 x — реактивное сопротивление;
 x_C — ёмкостное сопротивление;
 x_L — индуктивное сопротивление;
 x_M — сопротивление взаимной индукции;
 Y — комплексная проводимость; параметр четырехполюсника;
 Y_{ii} — входная проводимость i -го контура (ветви) или узла;
 Y_{ki} — передаточная проводимость контуров (ветвей) или узлов;
 Y_{ii} — собственная проводимость ветвей, сходящихся в узле;
 $Y_{(ik)}$ — общая проводимость; между узлами i и k ;
 $Y(p)$ — операторная проводимость;
 y — полная проводимость (модуль комплексной проводимости);
 Z — комплексное сопротивление; параметр четырехполюсника;
 Z_b — комплексное волновое сопротивление линии;
 Z_c — характеристическое сопротивление;
 Z_{ii} — входное сопротивление i -го узла или контура (ветви);
 Z_{kl} — передаточное сопротивление узлов или контуров (ветвей) i и k ;
 $Z_{(ii)}$ — собственное сопротивление контура i ;
 $Z_{(ik)}$ — общее сопротивление контуров i и k ;
 $Z(p)$ — обобщенное (операторное) сопротивление;
 z — полное сопротивление (модуль комплексного сопротивления);
 α — коэффициент ослабления линии;
 β — коэффициент фазы линии;
 γ — коэффициент распространения линии;
 δ — угол потерь; относительная расстройка частоты;
 Δ — определитель системы уравнений;
 Δ_{ik} — алгебраическое дополнение элемента i -й строки k -го столбца;
 ε_a — абсолютная диэлектрическая проницаемость;
 ϑ — температура;
 Λ — магнитная проводимость;
 λ — длина волны;
 μ_a — абсолютная магнитная проницаемость;
 ρ — удельное электрическое сопротивление; волновое сопротивление контура;
 τ — время, постоянная времени;
 Φ — магнитный поток;
 φ — фазовый сдвиг;
 Ψ — потокосцепление;
 ψ — начальная фаза;

ω — угловая частота;
 1, 2 и 0 — индексы, обозначающие составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Приставки для дальних и кратных единиц

Наименование приставки	Обозначение	Отношение к основной единице	Наименование приставки	Обозначение	Отношение к основной единице
Пико	п	10^{-12}	Санти	с	10^{-2}
Нано	н	10^{-9}	Гекто	г	10^2
Микро	мк	10^{-6}	Кило	к	10^3
Милли	м	10^{-3}	Мега	М	10^6

Единицы электрических и магнитных величин в системе СИ

Величина	Единица	
	наименование	обозначение
Ток	ампер	А
Заряд	кулон	Кл
Потенциал, напряжение, э.д.с.	вольт	В
Напряженность электрического поля	вольт на метр	В/м
Сопротивление	ом	Ом
Емкость	фарада	Ф
Магнитный поток	вебер	Вб
Магнитная индукция	tesла	Т
Индуктивность	генри	Г
Магнитодвижущая сила	ампер	А
Напряженность магнитного поля	ампер на метр	А/м
Энергия	дюйль	Дж
Мощность	ватт	Вт

ВВЕДЕНИЕ

Роль и значение электрической энергии в развитии народного хозяйства общеизвестны. Электричество стало основой развития всех отраслей техники, базой для развития промышленности, транспорта, сельского хозяйства, электросвязи; оно стало основой комплексной механизации и автоматизации производственных процессов. Электричество и радио прочно вошли в быт. Исключительно важное значение они имеют и в современной авиации; установленная мощность источников электрической энергии на самолетах, исчислявшаяся долями киловатта в начальный период развития авиации, в настоящее время достигает сотен киловатт на крупных самолетах. Продвижение науки по пути освоения космического пространства и изучения планет солнечной системы было бы невозможным без применения электричества и радио.

Столь широкому распространению электрической энергии во всех областях народного хозяйства и всех отраслях техники способствовали удобство передачи электромагнитной энергии на расстояние и удобство преобразования ее в другие формы энергии: механическую, световую, тепловую, химическую и др.

Классики марксизма-ленинизма* с первых же шагов развития науки об электричестве предсказали ей великое будущее. Известно, с каким пристальным вниманием следили К. Маркс и Ф. Энгельс за опытами по передаче электроэнергии на расстояние, предсказав огромное революционное значение применения электричества в промышленности. В 1850 г. К. Маркс, обращаясь к В. Либкнехту, говорил: «Царствование его величества пара, перевернувшего мир в прошлом столетии, окончилось; на его место станет неизмеримо более революционная сила — электрическая искра». Говоря о передаче электрической энергии

* Ссылки на документы Съездов и Пленумов КПСС, а также на труды В. И. Ленина, К. Маркса и Ф. Энгельса в учебных изданиях были обязательны для советского периода.

на расстояние, Ф. Энгельс в 1883 г. писал Э. Бернштейну, что «это открытие окончательно освобождает промышленность почти от всяких границ, полагаемых местными условиями, делает возможным использование также и самой отдаленной водяной энергии, и если в начале оно будет полезно только для городов, то в конце концов оно станет самым мощным рычагом для устранения противоположности между городом и деревней. Совершенно ясно, однако, что благодаря этому производительные силы настолько вырастут, что управление ими будет все более и более не под силу буржуазии»¹.

Энергетическая база дореволюционной России была крайне слаба. С первых дней существования Советской власти Коммунистическая партия придавала решающее значение делу электрификации страны для победы нового общественного строя. Всем памятны слова В. И. Ленина «Коммунизм — это есть Советская власть плюс электрификация всей страны». Выступая в 1920 г. на VIII Всероссийском съезде Советов, В. И. Ленин говорил: «...если Россия покроется густою сетью электрических станций и мощных технических оборудований, то наше коммунистическое хозяйственное строительство станет образцом для грядущей социалистической Европы и Азии»².

Общеизвестно, что первый хозяйственный план, Государственный план электрификации России (ГОЭЛРО), был назван В. И. Лениным второй программой партии.

Благодаря преимуществам социалистической системы планирования и развития народного хозяйства, обеспечившим успешное выполнение и перевыполнение пятилетних планов, в СССР создана мощная энергетическая база, которая даёт возможность быстрыми темпами повышать электроснабжение и производительность труда во всех отраслях промышленности и сельского хозяйства. По производству электроэнергии наша страна вышла на первое место в Европе и на второе в мире.

В СССР сооружена и пущена в 1954 г. первая в мире электрическая станция, использующая атомную энергию.

Ведущая роль электрификации в развитии всех отраслей народного хозяйства, в осуществлении всего современного технического прогресса раскрыта в Программе КПСС, принятой XXII съездом КПСС.

¹ К. Маркс и Ф. Энгельс. Соч. 2-е изд., т. 35, с. 374.

² В. И. Ленин. Полн. собр. соч. 5-е изд., т. 42, с. 161.

Советский Союз вступил в решающую стадию претворения в жизнь идеи В. И. Ленина о сплошной электрификации страны. Планом развития народного хозяйства СССР на 1976—1980 гг. предусмотрено довести производство электроэнергии в 1980 г. до 1380 млрд. кВт·ч. Одновременно с дальнейшей электрификацией промышленности и транспорта, автоматизацией производственных процессов и т. п. будут также электрифицированы все колхозы, совхозы и рабочие поселки. Создается и развивается Единая энергетическая система СССР, которая позволяет перебрасывать энергию из восточных районов страны в ее европейскую часть и связана с энергосистемами других социалистических стран.

Большое внимание уделяется освоению новых источников энергии и новых способов ее получения, в частности решению проблемы прямого преобразования различных видов энергии в электрическую.

Электрификация народного хозяйства была бы немыслима без развития учения об электричестве. В течение XIX и XX вв. учение об электричестве непрерывно развивалось, причем электротехника на ранних ступенях развития являлась разделом физики.

Первый трактат по электричеству, вышедший на русском языке в 1753 г., принадлежит отцу русской науки М. В. Ломоносову. Его «Слово о явлениях воздушных, от электрической силы происходящих» явилось одной из крупных работ в области электричества, написанных учеными XVIII в.

Исследования Ломоносова и его друга Рихмана, а также Франклина, Гальвани, Вольта и др., приведшие к изобретению громоотвода и источников электрической энергии (вольтова столба, гальванических элементов), положили начало систематическому изучению электрических явлений.

В. В. Петров, производя опыты в электрической цепи, обнаружил и исследовал в 1802 г. явление электрической дуги между угольными электродами при атмосферном давлении. Результаты этих исследований были опубликованы им в книге «Известие о гальвани-вольтовских опытах» (1803 г.).

В 1819 г. Эрстед обнаружил механическое действие электрического тока на магнитную стрелку, а в 1820 г. Ампер открыл магнитные свойства соленоида с током. Таким образом, было установлено, что прохождение тока сопровождается магнитными явлениями.

В 1831 г. М. Фарадей открыл и описал явление электромагнитной индукции. В 1833 г. Э. Х. Ленц установил правило определения индуктированного тока, выражающее фундаментальный принцип электродинамики — принцип электромагнитной инерции. В 1844 г. Ленцем и независимо от него Джоулем был открыт важный закон электротехники, известный под названием закона Джоуля — Ленца.

На основании теоретического обобщения экспериментальных данных по электричеству и магнетизму во второй половине XIX в. Д. Максвелл выдвинул гипотезу существования электромагнитного поля излучения. Разработанная им теория электромагнитного поля изложена в его труде «Трактат об электричестве и магнетизме» (1873 г.).

В 1888 г. Г. Герц опубликовал свои работы, в которых экспериментально доказал существование поля излучения. Однако Г. Герц и современные ему физики, занимавшиеся исследованием электромагнитного поля, не считали возможным выйти за пределы своих лабораторий и применить электромагнитные волны для беспроволочной связи.

Такую задачу впервые поставил и блестяще разрешил выдающийся русский ученый Александр Степанович Попов, практически осуществивший в 1895 г. первую в мире радиосвязь. Изобретение радио открыло новую эру в истории человечества.

В России формирование самостоятельной дисциплины «Теоретические основы электротехники» относится к концу XIX и началу XX вв. В 1904 г. проф В. Ф. Миткевич начал читать курс «Теория электрических и магнитных явлений» в Петербургском политехническом институте. Примерно тогда же началась подготовка инженеров электротехнической специальности в Московском высшем техническом училище, где проф. К. А. Круг приступил в 1905 г. к чтению курса «Теория переменных токов».

Предметом курса «Теоретические основы электротехники» является изучение как с качественной, так и с количественной сторон электромагнитных процессов, происходящих в цепях и полях. Этот курс, базирующийся на курсах физики и высшей математики, содержит инженерные методы расчета и анализа, применимые к широкому классу современных электротехнических устройств. Он имеет исключительно важное значение для формиро-

вания научного кругозора специалистов по электротехнике и радиотехнике и на нем основываются все специальные электротехнические и радиотехнические дисциплины.

В курсе ТОЭ применяются два способа описания электрических и магнитных явлений: при помощи понятий теории цепей и теории поля. Выбор того или другого способа диктуется условиями постановки задачи.

Теория цепей исходит из приближенной замены реального электротехнического устройства идеализированной схемой замещения. Эта схема содержит участки цепи, на которых определяются искомые напряжения и токи.

Теория цепей позволяет с достаточной для инженерной практики точностью определять непосредственно напряжение между концами рассматриваемого участка цепи, не прибегая к вычислению его между промежуточными точками. Токи также находят непосредственно, без вычисления их плотностей в различных точках сечения проводника.

Теория поля изучает изменение электрических и магнитных величин от точки к точке в пространстве и времени. Она исследует напряженности электрического и магнитного полей и с их помощью такие явления, как излучение электромагнитной энергии, распределение объемных зарядов, плотностей токов и т. п.

Разграничение областей применения теории цепей и теории поля является условным. Например, процессы распространения электрических сигналов в линиях электропроводной связи, исследуются как методами теории цепей, так и методами теории поля. Здесь сочетаются такие понятия, как напряжение и ток, характерные для теории цепей, и скорость распространения электромагнитной энергии, характерная для теории поля.

Первая и вторая части настоящего курса посвящены теории цепей; третья часть посвящена теории поля.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru