

ВЫСШЕЕ
ОБРАЗОВАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ПРОГРАММИРОВАННОЕ УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Под редакцией проф. В. Г. Герасимова

**Допущено Министерством высшего и среднего специального
образования СССР в качестве учебного пособия для студентов
неэлектротехнических специальностей вузов**



МОСКВА «ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1983

ББК 31.2
Э 45
УДК 621.3

*В. Г. Герасимов, Х. Э. Зайдель, В. В. Коген-Далин,
Э. В. Кузнецов, Д. Н. Морозов, И. В. Сильванский,
В. Б. Соколов, М. С. Цепляева, В. Л. Шатуновский,
Я. А. Шнейберг*

Рецензенты:

кафедра общей электротехники Уральского политехнического института (зав. кафедрой — д-р техн. наук, проф. М. Г. Резин)

кафедра общей электротехники Всесоюзного заочного политехнического института (зав. кафедрой — д-р техн. наук, проф. И. В. Гончаров)

Электротехника: Программир. учеб. пособие для не-
Э 45 электротехнич. спец. вузов/Герасимов В. Г., Зай-
дель Х. Э., Коген-Далин В. В. и др.; Под ред. В. Г. Ге-
расимова. — М.: Высш. шк., 1983. — 480 с., ил.

В пер.: 1 р. 20 к.

В книге рассматриваются все вопросы программы курса: цепи постоянного и переменного токов, магнитные цепи электротехнических устройств, трансформаторы, трехфазные асинхронные и синхронные машины, электрические машины постоянного тока, микромашины, основы электропривода и т. д.

В конце каждой главы даны ответы на вопросы и комментарии к ответам.

Э 2302000000—275
001(01)—83 105—83

ББК 31.2
6П2.1

ПРЕДИСЛОВИЕ

Новые задачи, вытекающие из решений XXVI съезда КПСС и постановления ЦК КПСС и Совета Министров СССР «О дальнейшем развитии высшей школы и повышении качества подготовки специалистов» (июнь 1979 г.), требуют значительного повышения качества преподавания, эффективности и результативности учебно-воспитательного процесса.

Одним из путей решения этих задач является усиление самостоятельной работы студентов, введение самоконтроля изучаемого материала с учетом индивидуальных особенностей и способностей каждого студента. Как показывает опыт, программированные учебные пособия способствуют достижению желаемых результатов. К основным «квантам» изложенного материала поставлены вопросы, позволяющие читателю проверить правильность понимания прочитанного. Ответы и комментарии к ним помещены в конце каждой главы, причем только один ответ из предлагаемых полностью верен. Наряду с верными встречаются частично правильные ответы, о чем сообщается в комментариях. В комментариях нередко ставится вопрос, развивающий и дополняющий изложенный в «кванте» материал, а иногда играющий роль наводящего на правильный ответ. В качестве неправильных использованы типичные ошибочные ответы студентов. Авторы стремились излагать материал так, чтобы в процессе его изучения студенты смогли усвоить основы электротехники.

Электротехника — одна из первых инженерных дисциплин, которую изучают студенты технических вузов. Знакомясь с краткой историей и перспективами ее развития, созданием важнейших электротехнических устройств, сложными взаимосвязями электротехники с другими отраслями, а также социально-экономическими явлениями, студенты смогут глубже осмыслить закономерности научно-технического прогресса, особенности развития науки и техники в нашей стране.

В процессе работы над настоящим пособием авторы руководствовались основными положениями методики преподавания курса электротехники, разработанными под руководством основателя кафедры общей электротехники Московского энергетического института заслуженного деятеля науки и техники проф. В. С. Пантюшина.

Авторы выражают признательность рецензентам—коллективам ка-

федр общей электротехники Всесоюзного заочного политехнического института (зав. кафедрой — д-р техн. наук, проф. И. В. Гончаров) и Уральского политехнического института (зав. кафедрой — д-р техн. наук, проф. М. Г. Резин) за ценные критические замечания, учтенные при окончательном редактировании книги.

Отзывы и предложения по улучшению содержания книги направлять по адресу: Москва, К-51, Неглинная ул., д. 29/14, издательство «Высшая школа».

Авторы

ВВЕДЕНИЕ

Трудно найти область современного производства, отрасль народного хозяйства, культуры, быта, где бы не использовалась электрическая энергия.

Как указывается в Программе КПСС, электрификация является стержнем строительства экономики коммунистического общества, она играет ведущую роль в развитии *всех* отраслей народного хозяйства. Следовательно, важнейшие изменения в развитии производства непосредственно связаны с развитием электроэнергетики и теплоэнергетики. Поэтому без знания электротехники нельзя быть хорошим специалистом, новатором производства.

В курсе электротехники изучаются электрические и магнитные явления и их применение для практических целей. Можно выделить три основных направления, в которых используются эти явления: преобразование энергии (энергетическое), превращение вещества (технологическое), получение и передача информации (информационное). Следовательно, электротехника — это область науки и техники, в которой используются электрические и магнитные явления для преобразования энергии и превращения вещества, а также для получения и передачи информации.

Курс электротехники должен дать студенту общие сведения, без которых он не может изучить и понять действие разнообразных электротехнических приборов и устройств и в дальнейшем научиться эффективно применять их в различных отраслях народного хозяйства.

Изучение электротехники имеет большое значение также в формировании марксистско-ленинского мировоззрения студентов. Вся история развития электротехники — убедительная иллюстрация диалектики научно-технического прогресса, путей преодоления противоречий инженерного творчества, отражение сложных взаимосвязей науки и техники с социально-экономическими, историческими и экологическими проблемами. При изучении сложных электромагнитных процессов студент убеждается в эффективности метода научных абстракций — единственно верного пути познания истины.

Огромное значение электрической энергии объясняется рядом ее преимуществ перед другими видами энергии. Главное состоит в том, что электрическая энергия наиболее универсальна, так как сравнительно легко преобразуется в другие виды энергии; кроме того, ее можно производить на мощных электростанциях, передавать на ог-

ромные расстояния при сравнительно небольших потерях и легко распределять между различными потребителями.

Одной из важнейших закономерностей научно-технического прогресса, впервые указанной К. Марксом, является то, что для успешного решения большой научно-технической проблемы всегда существуют объективные социально-экономические предпосылки.

Зарождение электротехники относится к первой половине XIX в., когда с развитием капиталистического производства все более остро начинала ощущаться необходимость в использовании электрической энергии. А возможность практического применения электромагнитных явлений была обусловлена успехами в области электромагнетизма.

После создания первого химического генератора электрического тока (А. Вольта, В. В. Петров) были обнаружены и в значительной степени изучены (к концу первой трети XIX в.) химические, тепловые, световые и магнитные действия тока, установлены важнейшие законы электрических цепей (Г. Х. Эрстед, А. М. Ампер, Г. С. Ом, М. Фарадей, Э. Х. Ленц). На основе этих открытий были созданы разнообразные электромашинные генераторы и электрические двигатели, проведены первые эффективные опыты по применению электричества для освещения, созданы первые электроавтоматические приборы, зародилась электроизмерительная техника. Однако широкое практическое применение электрической энергии в этот период еще было невозможно из-за отсутствия экономичного и надежного электрического генератора.

Значительный вклад в становление электротехники был сделан русскими учеными и инженерами. Еще в 1802 г. акад. В. В. Петров доказал возможность использования электрической дуги для освещения и плавки металлов. Первые практически пригодные электромагнитные телеграфы были созданы П. Л. Шиллингом (1832) и Б. С. Якоби (1839), в 1838 г. Б. С. Якоби осуществил электропривод на судне.

Новый этап в развитии электротехники как самостоятельной отрасли связан с созданием первого промышленного электромашинного генератора с самовозбуждением (З. Грамм, 1870).

Основными потребителями электроэнергии в эти годы были источники света, необходимость в которых все более увеличивалась по мере роста городов и развития промышленности. Началось строительство электрических станций.

Начало практическому применению электрического освещения положило изобретение П. Н. Яблочковым электрической свечи (1876). Им же был введен в практику переменный ток, осуществлено «дробление» электрической энергии посредством трансформаторов с разомкнутым магнитопроводом и показана целесообразность централизованного производства и распределения электроэнергии. А. Н. Лодыгиным были созданы первые лампы накаливания с угольным стержнем (1870) и вольфрамовой нитью (1893). Большая заслуга в создании промышленных типов однофазных трансформаторов с замкнутым шихтованным магнитопроводом (1885) принадлежит венгерским электротехникам М. Дери, О. Блати и К. Циперновскому.

По мере расширения практического применения электроэнергии возникает необходимость в изыскании способов экономичной передачи электрической энергии на значительные расстояния и создания простых и надежных электродвигателей, удовлетворяющих требованиям промышленного электропривода.

Следует отметить первые опыты по передаче электрической энергии (Ф. А. Пироцкий, 1874) и теоретические исследования (Д. А. Лахинов, 1880, М. Депре, 1881), в которых обоснована возможность экономичной передачи энергии на большое расстояние за счет повышения напряжения, первую линию электропередачи длиной 57 км при напряжении 2 кВ (М. Депре, 1882), открытие явления вращающегося магнитного поля (Г. Феррарис и Н. Тесла, 1888), разработку многофазных, в частности двухфазных и трехфазных, цепей, машин и трансформаторов (М. О. Доливо-Добровольский, Н. Тесла и др., 1889—1891).

Начало электрификации было положено в трудах М. О. Доливо-Добровольского, который осуществил первую электропередачу с помощью трехфазной цепи (Лауффен — Франкфурт, 1891), создал трехфазный асинхронный двигатель и трехфазный трансформатор. С этого времени в наиболее развитых капиталистических странах быстро возрастают мощность электрических станций и напряжение линий передач, разрабатываются новые конструкции электрических машин, аппаратов и приборов. Электрический двигатель все более проникает в область промышленного привода, вытесняя паровую машину. Процесс электрификации постепенно охватывает все новые области производства: развиваются электрометаллургия, электротермия, электрохимия. Электрическая энергия широко используется в самых разнообразных отраслях промышленности, на транспорте, в сельском хозяйстве и быту.

Рост потребности в постоянном токе (электрохимия, электрический транспорт и пр.) обусловил развитие преобразовательной техники. Вначале для преобразования переменного тока в постоянный применялись электромашинные устройства, а затем стали использоваться ионные приборы, что привело к зарождению новой отрасли техники — промышленной электроники.

Революционизирующая роль электричества в развитии производительных сил впервые была отмечена К. Марксом и Ф. Энгельсом. Развивая учение К. Маркса и Ф. Энгельса, В. И. Ленин научно обосновал роль электрификации в восстановлении и развитии народного хозяйства, в создании социалистической экономики нашей страны. Ленинская формула «Коммунизм — это есть Советская власть плюс электрификация всей страны» подчеркивает необходимость единства передового общественного строя — Советской власти и передовой экономики, базирующейся на электрификации.

Ленинский план электрификации страны — план ГОЭЛРО, утвержденный VIII Всероссийским съездом Советов в декабре 1920 г., положил начало радикальному преобразованию всего народного хозяйства нашей страны. Электрификация, предсказывал В. И. Ленин, «перепродит Россию». Успехи, достигнутые Советским государством,

являются убедительным доказательством того, что сбылось мудрое ленинское предсказание.

Советский Союз превратился в мощную индустриальную державу. В настоящее время СССР во многих областях энергетики и электропромышленности занимает ведущее место в мире. Об этом свидетельствуют создание мощных ГЭС и каскадов гидроэлектростанций, строительство крупнейших тепловых электростанций и мощных гидрогенераторов, невиданные темпы развития теплофикации, строительство высоковольтных линий электропередач и мощных объединенных энергосистем, высокий технический уровень электросетевого хозяйства.

К концу десятой пятилетки общая мощность всех электростанций страны достигла 270 млн. кВт, а выработка электроэнергии — около 1300 млрд. кВт · ч, т. е. почти удвоилась по сравнению с 1970 г. По производству электроэнергии СССР уступает только США, но вырабатывает ее в год больше, чем все страны Европейского экономического сообщества. Неземлемо возросли мощности электростанций. Так, например, мощность самой крупной в мире Красноярской ГЭС (6000 МВт) почти в 10 раз превышает мощность первенца советских пятилеток — Днепрогэса, а мощность строящейся Саяно-Шушенской ГЭС составит 6400 МВт. Более 50 тепловых электростанций имеют мощность свыше 1 млн. кВт. На Костромской ГРЭС с проектной мощностью 3 млн. 600 тыс. кВт установлен уникальный энергоблок мощностью 1 млн. 200 тыс. кВт. Мощность одной из крупнейших в мире Ленинградской АЭС составляет 4 млн. кВт.

Важнейшим достижением отечественной энергетики является создание Единой энергетической системы (ЕЭС) СССР, объединяющей электростанции общей мощностью 223 млн. кВт и являющейся крупнейшим в мире энергообъединением.

В соответствии с Основными направлениями экономического и социального развития СССР на 1981—1985 годы и на период до 1990 года, утвержденными XXVI съездом КПСС, в одиннадцатой пятилетке электроэнергетика и электротехника получают дальнейшее развитие. Производство электроэнергии к 1985 г. возрастет до 1555 млрд. кВт · ч; резко увеличится удельный вес ГЭС и АЭС. В европейской части страны прирост производства электроэнергии произойдет за счет ГЭС и АЭС, начнется строительство атомных теплоцентралей, на базе богатейших угольных месторождений — Экибастузского и Канско-Ачинского — будут сооружены крупнейшие в мире тепловые электростанции. Будут построены первые очереди сверхмощных линий электропередач на 1150 кВ переменного тока (Экибастуз — Урал) и 1500 кВ постоянного тока (Экибастуз — Центр). Так неуклонно осуществляются ленинские идеи электрификации страны.

Советские ученые и инженеры разрабатывают проекты еще более мощных энергоблоков и линий электропередач: проводятся исследования передачи электроэнергии напряжением до 2000 кВ, разрабатываются проекты турбогенератора мощностью 2000 МВт и криогенного турбогенератора мощностью 300 МВт, сооружается первый в мире мощный промышленный МГД-блок на Рязанской ГРЭС.

Разработка более совершенного электротехнического оборудова-

ния осуществляется на основе комплексного системного подхода, с учетом технико-экономических и экологических проблем. Многие сложные научно-технические задачи в области энергетики и электротехники решаются в содружестве с учеными стран — членов СЭВ.

В решениях XXVI съезда КПСС особое внимание было уделено повышению эффективности производства, экономии энергии, топлива, сырья.

Важнейшее значение приобретает в настоящее время экономия электроэнергии. Только в Москве 1% сэкономленной в год электроэнергии составляет 14,5 млн. кВт · ч, а 1 кВт · ч электроэнергии позволяет добыть 40 кг нефти или выплавить 100 кг чугуна.

Электроэнергетика более чем какая-либо другая отрасль народного хозяйства определяет уровень экономического развития страны. За последние десятилетия темпы роста потребления всех видов энергии значительно возросли; так, например, если мировое потребление энергии за 20 лет возросло вдвое, то потребление электроэнергии — в четыре раза. В общем спросе на энергию по прогнозам к 2000 г. электроэнергия составит 40% вместо 8—10% в 1972—1973 гг.

Рост мощности энергосистем, разработка новых методов генерирования, передачи и распределения электроэнергии, более глубокое проникновение электрической энергии во все отрасли народного хозяйства и возрастание роли электротехники как средства передачи и преобразования информации непосредственно связаны с созданием автоматизированных систем управления энергетическими и производственными процессами.

Последняя треть XX в. характеризуется существенными качественными сдвигами в разработке разнообразных электронных, полупроводниковых и электромагнитных элементов, позволившими автоматизировать процессы вычислений, обработку информации, моделирование сложных физических явлений, решение логических задач и т. д.

В одиннадцатой пятилетке намечается значительное расширение производства миниатюрных электронных управляющих машин как составной части основного технологического оборудования, приборов, различных систем управления и контроля, увеличение выпуска автоматических манипуляторов (промышленных роботов), более широкое использование электротехники при изучении живых организмов (электробиология) и исследовании космоса (космическая электродинамика).

Но как бы ни развивались и совершенствовались автоматические системы управления, роль человека всегда будет определяющей. Чтобы уметь творчески использовать преимущества электрификации, внедрять электронные и автоматические приборы и автоматизированные системы управления разнообразными производственными процессами, будущему инженеру-неэлектрику необходимо овладеть основами электротехники.

Глава I

ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И СВОЙСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

§ 1.1. Электрическая цепь

Понятие электрической цепи является одним из фундаментальных понятий электротехники.

Рассмотрим простейшую электрическую цепь, состоящую из аккумулятора, лампы накаливания, выключателя, амперметра и соединительных проводов. Для удобства описания электрической цепи используют ее графическое изображение, содержащее условные обозначения элементов цепи и показывающее, как они соединены. Такое графическое изображение называют схемой электрической цепи.

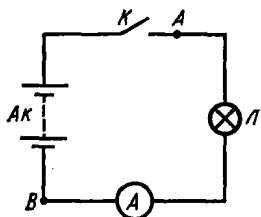


Рис. 1.1. Пример схемы электрической цепи

На рис. 1.1. приведена схема рассматриваемой электрической цепи. Аккумулятор Ак служит источником электрической энергии, получаемой за счет преобразования химической энергии, лампа накаливания Л — приемником, преобразующим электрическую энергию в световую и тепловую.

Существует множество различных типов источников электрической энергии, получаемой за счет преобразования химической, механической, тепловой и световой энергий. На рис. 1.2 приведены условные обозначения гальванического элемента (а), электро-

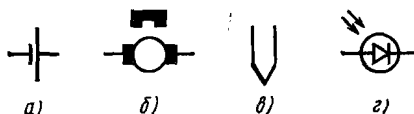


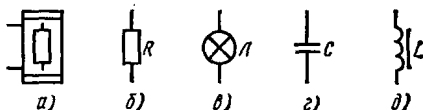
Рис. 1.2. Условные обозначения источников электрической энергии: а — гальванический элемент; б — электрическая машина постоянного тока с постоянными магнитами; в — термопара; г — фотодиод

машинного генератора (б), термопары (в) и фотозлемента (г), преобразующих указанные виды энергии в электрическую. В подобных элементах и устройствах происходят различные процессы, связанные с образованием и изменением электромагнитных полей. Общим для всех источников является то, что в результате происходящих в них процессов между выходными клеммами источников появляются электродвижущие силы, которые вызывают токи в замкнутых цепях и напряжения на элементах цепи.

Не менее разнообразны типы приемников электрической энергии. Например, аккумулятор становится приемником в процессе его зарядки, когда электрическая энергия превращается в химическую. В электрической машине, работающей в режиме двигателя, электрическая энергия преобразуется в механическую, в электрической печи

Рис. 1.3. Условные обозначения приемников электрической энергии:

а — электрическая печь сопротивления; *б* — резистор; *в* — лампа накаливания; *г* — конденсатор; *д* — дроссель



(рис. 1.3, *а*) или резисторе (рис. 1.3, *б*) — в тепловую, в светодиоде, лампе накаливания (рис. 1.3, *в*) — в световую. В этих приемниках происходят необратимые преобразования электрической энергии в другие виды энергии. Особую группу составляют приемники, в которых происходят обратимые преобразования электрической энергии в энергию электрического поля (конденсаторы, рис. 1.3, *г*) и магнитного поля (индуктивные катушки, дроссели, рис. 1.3, *д*).

Источники и приемники соединяются в электрической цепи проводами, которые должны обеспечить передачу электрической энергии от источников к приемникам с небольшими потерями.

Заметим, что, подобно тому как ни одно механическое устройство не может преобразовать движение без потерь на трение, в результате которого часть механической энергии необратимо превращается в тепловую, любое преобразование электрической энергии в элементах цепи сопровождается частичным (или полным) преобразованием ее в тепловую энергию. Это имеет место как в источниках, так и в приемниках и соединяющих проводах.

В электрические цепи часто включают вспомогательные и измерительные устройства. Вспомогательные элементы служат для управления режимом электрической цепи (например, коммутаторы), защиты от перенапряжений или недопустимого значения тока (предохранители, токовые реле). На рис. 1.4 приведены условные обозначения неко-

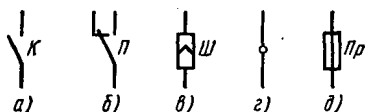


Рис. 1.4. Условные обозначения вспомогательных элементов:

а — выключатель; *б* — переключатель; *в* — штепсельный разъем; *г* — разборное соединение проводов (зажим); *д* — плавкий предохранитель

торых вспомогательных элементов: выключателя (*а*), переключателя (*б*), штепсельного разъема (*в*), зажима (*г*), предохранителя (*д*).

Существует большое количество различных видов электрических цепей, которые классифицируют в зависимости от их назначения, элементного состава, скорости изменения токов и напряжений и т. д. Например, электрические цепи сетей снабжения потребителей электрической энергией отличаются большими мощностью и протяженностью, значительным числом элементов. Нормальную работу таких цепей обеспечивают вспомогательные цепи связи, управления и сигнализации, цепи защиты от недопустимых значений токов и напряжений. Такие электрические цепи изучают в курсах «Электрические сети и системы», «Системы проводной связи», «Электроавтоматика» и др. Электрические цепи радиоприемных и радиопередающих уст-

роиств отличаются наличием многих специальных элементов, сложной схемой их соединений, комбинированным использованием одних и тех же элементов для различных целей, быстрыми изменениями токов и напряжений во времени. Мощности этих цепей сравнительно небольшие, но зато имеются строгие требования к сохранению формы электрических сигналов. Для электрических цепей электронных вычислительных машин характерны большое многообразие состояний, огромное количество элементов и очень сложная схема их соединений.

Главное назначение любой электрической цепи — передача электрической энергии от источников к приемникам. Энергия в электрической цепи транспортируется электромагнитным полем. Поэтому, казалось бы, для количественного расчета получаемой, передаваемой и потребляемой энергии необходимо рассчитывать электромагнитное поле в элементах цепи. Однако решение указанных задач представляет значительные трудности. За сравнительно короткий срок развития электротехники были найдены более простые и достаточно точные способы описания электрической цепи, которые позволили существенно упростить эти задачи.

Электромагнитное поле описывается локальными значениями напряженностей электрического и магнитного полей (E и H), электрического смещения D , магнитной индукции B , плотности электрического тока J , которые удовлетворяют системе векторных дифференциальных уравнений Максвелла в частных производных. Решение этой системы уравнений и составляет основную трудность. Исследования электрических цепей показали, что локальные векторные параметры электромагнитного поля можно заменить интегральными скалярными значениями ε , d , s , e , напряжения u и тока i . Эти значения ε , u и i^* позволяют описывать состояния электрических цепей обыкновенными дифференциальными уравнениями. Во многих практически важных случаях удается в дальнейшем преобразовать систему дифференциальных уравнений в систему алгебраических уравнений.

Описанные основные отличительные признаки, характеризующие электрическую цепь, позволяют дать для нее такое определение.

Электрической цепью называется «совокупность устройств и объектов, образующих путь для электрического тока, электромагнитные процессы в которых могут быть описаны с помощью понятий об электродвижущей силе, токе и напряжении»**.

Понятия электродвижущей силы (э. д. с.), тока и напряжения рассматриваются в курсе физики. В электротехнике широко пользуются этими важнейшими понятиями, причем термин «напряжение» применяют в несколько ином, более практическом смысле. Поэтому эти понятия будут кратко рассмотрены далее.

Вопрос 1.1. В строительных работах для подогрева бетонного раствора иногда применяют электрическую энергию, которая передается с помощью системы

* Строчными буквами далее будем обозначать значения э. д. с., напряжения и тока, зависящие от времени, прописными — их постоянные значения.

** ГОСТ 19880—74. Электротехника. Основные понятия. Термины и определения. М., 1974, с. 32.

электродов. Можно ли отнести систему, состоящую из источника электрической энергии, соединительных проводов, электродов и электропроводящей массы бетона, к электрической цепи?

§ 1.2. Электрический ток. Первый закон Кирхгофа

В электротехнике используется понятие полного тока $i_{\text{полн}}$, равного сумме тока проводимости i , обусловленного движением носителей заряда, и тока смещения $i_{\text{см}}$, вызванного изменением электрического смещения D :

$$i_{\text{полн}} = i + i_{\text{см}} = \int_S \left(\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) d\mathbf{S} = \int_S \mathbf{J}_{\text{полн}} d\mathbf{S}, \quad (1.1)$$

где $\mathbf{J}$ и $\mathbf{J}_{\text{полн}}$ — соответственно плотности тока проводимости и полного тока; S — площадь, через которую определяется ток.

Напомним, что электрическое смещение для большинства веществ пропорционально абсолютной диэлектрической проницаемости ϵ_a и напряженности электрического поля E ($D = \epsilon_a E$) и характеризует способность веществ к поляризации.

Ток проводимости равен скорости переноса электрического заряда q через выделенную площадку: $i = dq/dt$. В любой электрической цепи существует ток проводимости, но могут отсутствовать токи смещения.

Если в электрической цепи с источником переменного напряжения включен конденсатор, то в ней помимо тока проводимости возникают токи смещения. Из курса физики известно, что ток смещения в конденсаторе и ток проводимости провода, соединенного с конденсатором, равны.

В электрических цепях с сосредоточенными параметрами, которые рассматриваются в курсе «Электротехника», принято, что все токи смещения сосредоточены в элементах цепи (например, конденсаторах). Токами смещения в пространстве, окружающем элементы и соединительные провода, пренебрегают ввиду их малости. В практической электротехнике для измерения электрического тока применяют амперметры, которые включают в провод цепи. Таким образом, амперметр измеряет ток проводимости. Поэтому все уравнения состояния электрической цепи далее удобно записывать для токов проводимости.

Для тока проводимости справедливо уравнение, которое вытекает из закона сохранения зарядов системы:

$$\oint_S \mathbf{J} d\mathbf{S} = 0, \quad (1.2)$$

где S — замкнутая поверхность, пересекающая провода электрической цепи.

Согласно этому уравнению, скорость увеличения заряда внутри поверхности S , вызываемого токами одних проводов, равна скорости уменьшения заряда, вызываемого токами других проводов.

Из уравнения (1.2) при указанных допущениях вытекают три важных следствия.

Первое следствие: значения токов в любых сечениях неразветвленного участка цепи одинаковы.

Выделим в электрической цепи часть, содержащую совокупность соединенных элементов и называемую участком цепи, например участ-

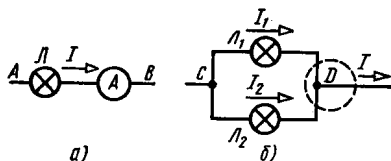


Рис. 1.5. Простейшие соединения элементов электрической цепи:
а — последовательное; б — параллельное

ток AB на рис. 1.1 с лампой накаливания и амперметром. Схема этого участка представлена на рис. 1.5, а. Граничные точки A и B участка можно соединить только одной линией, проходящей через элементы и провода. Будем называть такой участок *неразветвленным*. В противном случае (рис. 1.5, б) участок цепи называется *разветвленным*.

Для участка цепи, изображенного на рис. 1.5, а, значения токов через сечения провода в точках A и B одинаковы. Таким образом, неразветвленный участок цепи характеризуется одним током. За положительное направление тока принимают направление движения положительных зарядов. Это направление, неизменное при постоянном токе, принято обозначать на электрических схемах светлой стрелкой. Если ток в цепи изменяет знак (переменный ток), на схеме также наносят стрелку тока, которая указывает направление движения положительных зарядов при положительном значении тока.

Соединение элементов, составляющее неразветвленный участок цепи, называется *последовательным*. Свойства электрических цепей с последовательным соединением элементов рассмотрены в гл. 2.

Второе следствие дает соотношение между токами в разветвленном участке цепи. Разветвление цепи образуется в точках соединения проводов, которые называют *узлами* (C и D на рис. 1.5, б). В простейшем случае между узлами цепи элементы включены последовательно. Такой участок цепи, включенный между узлами, называют *ветвью*. Ветвь характеризуется одним током. На рис. 1.5, б между узлами C и D включены две ветви, каждая из которых содержит по одному элементу цепи. Так как полный ток через замкнутую поверхность, окружающую узел D (на рис. 1.5, б она условно изображена пунктиром), согласно (1.2) равен нулю, справедливо уравнение

$$I = I_1 + I_2. \quad (1.3)$$

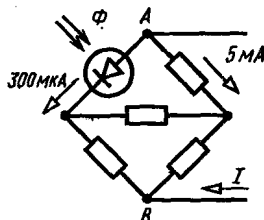
Аналогичное соотношение получается и для токов, изменяющихся во времени. В общем случае для любого узла справедлив первый закон Кирхгофа — алгебраическая сумма токов всех ветвей, соединенных с узлом, равна нулю:

$$\sum i_k = 0. \quad (1.4)$$

В этой сумме со знаком плюс записываются токи, направленные от узла, и со знаком минус — токи, направленные к узлу.

До сих пор считалось, что элементы цепи имеют два зажима (полюса). Такие элементы называют двухполюсными. Существуют, однако, многополюсные элементы цепи, например транзисторы, вакуумные лампы, трансформаторы и др.

Третье следствие: алгебраическая сумма токов полюсов любого многополюсника равна нулю независимо от его типа и конструктивного исполнения. Таким образом, уравнение (1.4) справедливо как для узла, так и для многополюсного элемента.



Вопрос 1.2. Чему равен ток I участка AB электрической цепи, изображенного на рис. 1.6?

Рис. 1.6. К вопросу 1.2

§ 1.3. Электродвижущая сила, напряжение и разность потенциалов. Второй закон Кирхгофа

Электродвижущая сила является единственной причиной длительного существования тока в электрической цепи. Ее возникновение может быть и неэлектрической природы, если, например, разделение зарядов происходит под действием химической реакции. Силы, которые разделяют заряды разных знаков, преодолевая электростатические силы притяжения, называются сторонними. Для количественного описания сторонних сил вводят понятие напряженности стороннего электрического поля $E_{ст}$, которая численно равна сторонней силе, действующей на единичный положительный заряд. В этом случае э. д. с. e определяется линейным интегралом от напряженности стороннего электрического поля:

$$e = \int E_{ст} dl. \quad (1.5)$$

Э. д. с. может возникать и вследствие явления электромагнитной индукции, вызванного изменением магнитного потока Φ через площадку контура, образованного проводом. При этом безразлично, связано ли это изменение с движением контура или с изменением магнитной индукции. Из закона электромагнитной индукции следует, что

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{d}{dt} \int S \mathbf{B} d\mathbf{S}. \quad (1.6)$$

Напряжение между точками a и b электрической цепи равно линейному интегралу от напряженности электрического поля:

$$u_{ab} = \int_a^b E dl = \int_a^b (E_{ст} + E_{кул}) dl, \quad (1.7)$$

где $E_{\text{кул}}$ — кулоновская (безвихревая, потенциальная) составляющая напряженности, которая в отличие от $E_{\text{ст}}$ удовлетворяет условию

$$\oint E_{\text{кул}} d\mathbf{l} = 0. \quad (1.8)$$

Электрическое поле, не удовлетворяющее этому условию, называется вихревым.

Напомним, что в курсе физики напряжение введено для определения работы, совершаемой по переносу единичного положительного заряда электростатическими и сторонними силами. В вихревом электрическом поле эта работа зависит от выбора пути переноса заряда, т. е. пути интегрирования в формуле (1.7).

В безвихревом поле работа по переносу заряда не зависит от формы пути, поэтому применимы понятия потенциала и разности потенциалов:

$$\varphi_a - \varphi_b = \int_a^b E_{\text{кул}} d\mathbf{l}. \quad (1.9)$$

Таким образом, для поля, характеризующегося напряженностью $E = E_{\text{кул}}$, электрическое напряжение совпадает с разностью потенциалов.

В электрической цепи имеются области с различными полями. Поэтому для некоторых участков цепи напряжение зависит от пути интегрирования.

Для практической электротехники характерно широкое применение измерительных приборов. Измерения напряжений производят вольтметрами, которые с помощью соединительных проводов подключают к электрической цепи. Если все вихревые поля сосредоточены в элементах цепи, то линия, образованная проводами вольтметра, будет располагаться в безвихревом поле, что обеспечивает однозначное значение напряжения независимо, например, от длины проводов вольтметра. Исследования показали, что в большинстве электрических цепей, которые называют цепями с сосредоточенными параметрами, допущение малости вихревых полей вне элементов цепи выполняется с достаточно высокой степенью точности. Поэтому далее всюду под напряжением в электрической цепи будем понимать напряжение, определяемое выражением

$$u_{ab} = \int_a^b E d\mathbf{l},$$

при условии, что линия интегрирования проходит в пространстве, окружающем элементы и провода электрической цепи, в котором отсутствуют вихревые и сторонние поля.

Заметим, что в курсе физики [9] напряжение на источнике электрической энергии определяют по линии интегрирования, проходящей через источник. Напряжение, определяемое таким образом, будет