

Е. В. КИТАЕВ И Н. Ф. ГРЕВЦЕВ

КУРС ОБЩЕЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

СУДПРОМГИЗ

1960

Е. В. КИТАЕВ, Н. Ф. ГРЕГ

КУРС ОБЩЕЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

ИЗДАНИЕ ПЯТОЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

Допущено

*Министерством высшего и среднего специального образования РСФСР
в качестве учебного пособия для неэлектротехнических
специальностей высших учебных заведений*



ГОСУДАРСТВЕННОЕ СОЮЗНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
СУДОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Ленинград
1960

Книга является учебным пособием по курсу общей электротехники для неэлектротехнических вузов и втузов и написана по программе, утвержденной Министерством высшего образования СССР в 1958 г. В ней изложена теория постоянного и переменного токов, дано описание электроизмерительных приборов, электрических машин и трансформаторов, ионных и электронных приборов, электрических сетей и станций. Кроме того, приведено большое количество подробно решенных примеров, которые можно использовать для упражнений и контрольных заданий.

Книга может быть полезна также инженерам-неэлектрикам, соприкасающимся в процессе своей работы с электрооборудованием.

ОТ АВТОРОВ

Настоящее, пятое издание книги, как и предыдущие, является учебным пособием по курсу «Общая электротехника» для неэлектротехнических вузов и втузов и переработано в соответствии с программой, утвержденной Министерством высшего образования СССР в 1958 г.

Особенностью пособия является наличие в нем обширного раздела по электронике, так как в современной технике электронные приборы нашли очень широкое применение.

В книге имеются ссылки на «Правила устройства электротехнических установок», которые сокращенно названы «Правилами», а также на действующие ГОСТы по электрооборудованию (измерительные приборы, электромашинны, лампы). Эти ссылки вводят учащихся в круг практической деятельности.

Рукопись книги была обсуждена на заседании кафедры энергетики Московского инженерно-экономического института имени Орджоникидзе, членами которой были даны ценные советы и указания, за что авторы считают своим долгом выразить благодарность заведующему кафедрой доктору техн. наук профессору С. П. Жебровскому и всем членам кафедры, принимавшим участие в обсуждении.

Кроме того, рукопись была просмотрена А. Ф. Симоновым и В. И. Константиновым, которые сделали ряд замечаний, с благодарностью принятых авторами.

Главы 1—5 книги написаны заслуженным деятелем науки и техники доктором техн. наук профессором Е. В. Китаевым; введение и главы 6—14 написаны кандидатом техн. наук доцентом Н. Ф. Гревцевым.

Авторы считают своим приятным долгом выразить сердечную благодарность научному редактору кандидату техн. наук доценту И. Г. Меерсону.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время нет такой области техники, где бы не применялось электричество, что вытекает из преимуществ электрической энергии перед другими видами энергии.

«Единственной материальной основой социализма,— учил В. И. Ленин,— может быть крупная машинная промышленность, способная реорганизовать и земледелие. Но этим общим положением нельзя ограничиться. Его необходимо конкретизировать. Соответствующая уровню новейшей техники и способная реорганизовать земледелие крупная промышленность есть электрификация всей страны».¹

Реализуя свое учение, В. И. Ленин в 1919 г. поставил задачу — срочно разработать единый общегосударственный план электрификации России.

В 1920 г., по инициативе Ленина, правительство утвердило специальную комиссию, которой было поручено составление плана электрификации России. Эта комиссия была названа Государственной комиссией по электрификации России (ГОЭЛРО).

Работа по составлению плана электрификации была в основном завершена в октябре 1920 г. К 1930 г. план ГОЭЛРО был в основном выполнен, а через 15 лет перевыполнен в 2,5 раза.

С 1929 года электрификация страны развивалась по великим планам пятилеток.

Зажглись огни крупнейшей в Европе Днепровской гидроэлектростанции, были пущены Челябинская, Зуевская, Кузнецкая и многие другие крупные тепловые электростанции. За годы пятилеток в Советском Союзе почти заново создана электротехническая промышленность, обеспечившая технико-экономическую независимость страны от капиталистических государств в области производства всех видов электрических машин, аппаратов, электротех-

¹ В. И. Ленин, Соч., т. 32, стр. 434.

нических материалов. Неизмеримо выросли мощности электростанций и выработка электроэнергии (в 25 раз по сравнению с царской Россией), протяженность электрических сетей и линий электропередачи (более чем в 200 раз). Высокого уровня достигла электрификация промышленности на основе внедрения автоматизированного электропровода, электротермии и электросварки. Значительное развитие получила электрификация транспорта, городов и быта.

В Великой Отечественной войне советская энергетика, электро- и радиопромышленность сыграли важную роль в достижении победы, полностью обеспечив потребности фронта и тыла в снабжении энергией и оборудованием.

Экономическая основа СССР оказалась несравненно более жизнеспособной, чем экономика капиталистических государств. Однако война нанесла серьезные раны нашей энергетике. Многие станции были разрушены. Усилиями советских людей еще до окончания войны началось возрождение электростанций, и в 1946 г. был достигнут довоенный уровень производства электроэнергии в стране.

В 1951 г. в СССР было произведено уже более 100 миллиардов киловатт-часов электроэнергии, а в 1958 г.— 233 миллиарда киловатт-часов.

В настоящее время по производству электроэнергии СССР занимает первое место в Европе и второе в мире. По темпам роста мощностей электростанций и выработки электроэнергии СССР занимает первое место в мире.

Величественную перспективу дальнейшего развития электрификации нашей страны открывают контрольные цифры развития народного хозяйства СССР на 1959—1965 гг., утвержденные XXI съездом КПСС.

Выработка электроэнергии в стране в 1965 г. достигнет 500—520 миллиардов киловатт-часов, установленная мощность электростанций возрастет более чем в 2 раза.

Наряду с дальнейшей электрификацией промышленности в течение семилетия будут электрифицированы железные дороги протяженностью примерно 20 тысяч километров, а также все совхозы, ремонтно-технические станции, колхозы и рабочие поселки.

Установленная мощность тепловых турбинных электростанций к концу семилетия увеличится в 2,3—2,4 раза. Из 58—60 миллионов киловатт новой мощности, вводимых на турбинных электростанциях,

47—50 миллионов киловатт будет введено на тепловых электростанциях, в основном за счет строительства крупных конденсационных станций мощностью по одному миллиону киловатт и более, с установкой на них по блочной схеме (котел—турбина) агрегатов по 300, 600 и 800 тысяч киловатт, позволяющих значительно ускорить и удешевить строительство. Одновременно подготовлен эскизный проект установки в миллион киловатт.

Укрупнение мощности тепловых электростанций в сочетании с широким применением на многих из них природного газа и мазута позволит на всех конденсационных электростанциях, строящихся в 1959—1965 гг., снизить сметную стоимость одного киловатта установленной мощности в среднем на 23% по сравнению с 1958 г.

Наряду с вводом в действие мощных тепловых электростанций планируется завершение строительства Сталинградской (2,5 млн. киловатт), Братской (4,6 млн. киловатт), Кременчугской (625 тыс. киловатт), Воткинской (1,0 млн. киловатт), Бухтарминской (5,25 тыс. киловатт) и других гидроэлектростанций. Предусмотрено также начало строительства нескольких новых гидроэлектростанций, главным образом в районах, не располагающих достаточными и дешевыми топливными ресурсами. Например, предусмотрено строительство Красноярской ГЭС. Это будет крупнейшая в мире гидроэлектростанция с мощностью 6 миллионов киловатт.

Мощность каждого агрегата достигнет 500 тысяч киловатт. Это позволит снизить себестоимость одного киловатт-часа электроэнергии до 0,5—0,4 копейки.

Ежегодно Красноярская ГЭС будет вырабатывать электроэнергию примерно столько же, сколько Волжская имени В. И. Ленина и Сталинградская вместе взятые.

За семилетие будут созданы единые энергетические системы Европейской части СССР и Центральной Сибири, а также объединенные энергетические системы в районах Северо-Запада и Запада, Закавказья, Казахстана и Средней Азии.

Предусматривается увеличение протяженности электрических сетей напряжением 35—500 киловольт примерно в 2,5—3 раза, что позволит более широко охватить централизованным электрообеспечением города, промышленные и сельские районы страны и сократить строительство мелких, дорогих и неэкономичных электростанций. Ставится задача развернуть строительство межколхозных и межрайонных электростанций с привлечением средств колхозов.

Намечается дальнейшее развитие теплофикации промышленных предприятий и городов.

За семилетие будут осуществлены крупные мероприятия по использованию атомной энергии в мирных целях. Вступит в строй ряд атомных электростанций с различными типами реакторов.

Успешное развитие энергетической базы позволит в предстоящем семилетии осуществить дальнейшую электрификацию народного хозяйства и тем самым в значительной степени обеспечит решение главной задачи семилетнего плана — задачи крутого подъема всех отраслей экономики на базе преимущественного роста тяжелой индустрии, с целью значительного усиления экономического потенциала и оборонной мощи страны при одновременном все более полном удовлетворении растущих материальных и духовных потребностей народа.

Успешное решение этих задач возможно только в результате резкого подъема производительности труда на основе широкого внедрения новой техники, комплексной механизации и автоматизации производственных процессов. В решении этих вопросов роль электрификации народного хозяйства выступает на первый план, ибо комплексная механизация и особенно комплексная автоматизация производства немыслимы без широкого внедрения средств электротехники. Все современные формы автоматизации сводятся в итоге к электроавтоматике.

Наряду с большими планами электрификации промышленности, значительное внимание в предстоящем семилетии будет уделено и электрификации сельского хозяйства. В 1959—1965 гг. предусмотрено в основном завершить электрификацию всех совхозов и колхозов страны. Потребление электроэнергии в сельском хозяйстве возрастет за 7 лет примерно в 4 раза.

Коренную техническую реконструкцию претерпит за семилетие железнодорожный транспорт. Намечается электрификация дорог протяженностью около 20 тысяч километров, в результате чего сеть электрифицированных железных дорог увеличится примерно в 3 раза. В целом предстоящее семилетие явится решающим этапом в осуществлении идеи В. И. Ленина о сплошной электрификации страны.

Развитие электрификации страны требует создания условий для непрерывного роста применения электроэнергии, т. е. создания огромной массы машин, установок, приборов и аппаратов, с помощью

которых осуществляется использование электроэнергии в народном хозяйстве и в быту.

Поэтому в семилетнем плане особое внимание уделяется развитию электротехнической промышленности, являющейся важнейшей технической базой электрификации страны.

Основная задача в области электротехнической промышленности состоит в том, чтобы на основе последних достижений науки и практики резко поднять технический уровень и качество электрических машин и аппаратов, кабельных изделий и изоляционных материалов и удовлетворить потребность в них всех отраслей народного хозяйства и быта трудящихся.

Производство продукции электротехнической промышленности намечается увеличить за семилетие примерно в 2,5 раза. Предусматривается создание новых видов электрооборудования, отвечающего тяжелым условиям работы в химической, угольной, нефтяной промышленности и других отраслях. В подавляющем большинстве предполагается выпуск оборудования с уменьшенными весами и габаритами за счет применения новых более совершенных электротехнических материалов.

КРАТКИЙ ИСТОРИЧЕСКИЙ ОЧЕРК РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Электрические и магнитные явления были известны еще в глубокой древности. Однако серьезными, действительно научными исследованиями электричества занялся отец русской науки Михаил Васильевич Ломоносов.

Вместе со своим соратником Георгием Рихманом Ломоносов изобрел первый электроизмерительный прибор, что позволило им впервые перейти к количественным исследованиям электричества.

Труды Ломоносова получили большую известность не только в России, но и за рубежом. Крупнейшие зарубежные ученые высоко оценили их. Труды Ломоносова оказали огромное влияние на формирование научных взглядов и научных теорий, а следовательно, и на ход развития мировой науки.

Современник Ломоносова русский академик Эпинус обратил внимание на сходство электрических и магнитных явлений.

Конец XVIII и начало XIX века ознаменовались важными открытиями в области электричества и магнетизма: французский ученый Кулон установил закон взаимодействия между заряженными телами (1785 г.); итальянский физик Вольта (1745—1827 гг.) открыл электрический ток, а русский академик В. В. Петров (1761—1834 г.) получил электрическую дугу.

В. В. Петров впервые в мире открыл возможность получать при помощи электричества металлы из руд. Ему принадлежит также часть первых опытов, последующее развитие которых привело Н. Н. Бенардоса и Н. Г. Славянова к осуществлению электрической сварки.

В. В. Петров опередил в своих научных исследованиях передовых европейских ученых-современников и заложил основы ряда новых отраслей техники: электрического освещения, электрометаллургии, электросварки, электрохимии.

В те же годы датский физик Эрстед установил связь электрического тока с магнитным полем (1819 г.); выдающийся французский ученый Ампер создал материалистическую теорию, объясняющую магнитные явления (1820 г.); немецкий физик Ом установил пропорциональность между током и приложенным к цепи напряжением (1827 г.); немецкий физик Кирхгоф (1824—1887 гг.) впервые установил законы протекания тока в электрических цепях. Наконец,

в 1831 г. английский ученый Фарадей открыл фундаментальный закон электродинамики — закон электромагнитной индукции.

Английский физик Максвелл (1831—1879 гг.) создал теорию электромагнитного поля; изложил в математической форме, углубил и расширил основные физические идеи Фарадея.

Немецкий ученый Гаусс (1777—1855 гг.), много работавший в области исследования земного магнетизма, совместно с немецким физиком Вебером (1804—1891 гг.) разработал систему абсолютных электрических единиц. Вебер осуществил экспериментальную проверку законов электродинамики.

Немецкий физик Герц (1857—1894 гг.) впервые экспериментально получил электромагнитные колебания, столь широко применяемые в наши дни благодаря работам А. С. Попова, исследовал свойства электромагнитных колебаний и установил соответствие их теоретическим выводам Максвелла.

По мере накопления человеческих знаний об электромагнитных явлениях усиливалось стремление применить эти явления для практических целей. В этом вопросе особенно значительна роль русских ученых.

Русский академик Шиллинг изобрел электромагнитный телеграф; академик Э. Х. Ленц, объединив открытия Ампера и Фарадея, установил общий закон электромагнитной инерции, заложил основы теории электрических машин.

Ленц сформулировал закон, устанавливающий направление индуктированного тока, вошедший в современную электротехнику под названием «закон Ленца».

Другой известный закон физики — закон Ленца—Джоуля, — закон теплового действия тока, установлен Ленцем в 1844 г. независимо от работ Джоуля.

Ближайший соратник Ленца — другой русский академик — Б. С. Якоби совместно с Ленцем занимался изучением законов электромагнетизма и электромагнитных явлений. Результатом этих работ явилось то, что Якоби построил в 1838 г. первый в мире электродвигатель постоянного тока с вращательным движением, приводивший в движение лодку на реке Неве.

Большое значение в деле практического применения электроэнергии имели изобретения электрической свечи и лампы накаливания, также принадлежащие русским ученым П. Н. Яблочкову и А. Н. Лодыгину.

Как известно, В. В. Петров указал на возможность применения электрической дуги для освещения.

В качестве простого, удобного, дешевого и экономичного источника света Яблочков предложил «электрическую свечу», получившую впоследствии название «свеча Яблочкова».

Стремясь сделать каждую свечу или группу свечей независимой от других, Яблочков предложил способ «дробления света», при котором каждая свеча включалась не непосредственно в сеть переменного тока, а через специальный изобретенный им прибор, который

теперь известен в электротехнике под названием трансформатора.

Гордостью каждого советского человека должен являться тот факт, что приоритет применения электрического освещения как электрической дугой, так и лампами накаливания принадлежит Яблочкову и Лодыгину.

Энергичным и деятельным соратником Яблочкова и Лодыгина был В. Н. Чиколев. Им была изобретена первая дуговая лампа с дифференциальным регулятором. Ее описание было дано в 1879 г. Большой заслугой Чиколева перед наукой является разработанная им теория электрических прожекторов и методика их испытания.

Один из основоположников русской физики А. Г. Столетов провел капитальные исследования в области магнетизма (1872 г.)

Работы Столетова имели исключительное практическое значение в деле рационального конструирования электрических генераторов, двигателей и трансформаторов.

Выдающиеся работы Столетова по исследованию влияния света на электрические разряды в газах, открытое им явление фотоэффекта и установление законов этого явления получили мировую известность.

Особо следует отметить труды и приоритет русских ученых и изобретателей в области передачи электрической энергии.

В 1876 г. Ф. А. Пироцкий произвел опыт электропередачи по рельсам конной железной дороги в Петербурге на Песках и в районе Дегтярного переулка и Болотной улицы. Он передавал ток по рельсам, приводя в движение вагон при помощи установленного на нем электродвигателя.

Этот опыт был, по существу, пуском первого в мире трамвайного вагона, осуществленным в России за 5 лет до пуска трамвая на линии Берлин—Лихтерфельд. Таким образом, первый трамвай в мире появился в России в 1876 г.

Русским ученым принадлежит также первенство и в деле разработки теоретических основ и расчета электропередачи. Д. А. Лапинов в 1880 г. первый в мире теоретически доказал возможность и целесообразность передачи электрической энергии на большие расстояния.

Среди блестящих имен русских электротехников, обогативших русскую науку изобретениями и открытиями, имеющими мировое значение, имя гениального изобретателя и инженера М. О. Доливо-Добровольского является одним из самых выдающихся.

Подлинно мировую известность Доливо-Добровольскому принесли его труды по системе трехфазного тока и построение первых трехфазных асинхронных двигателей и трансформаторов. Он предложил соединение цепей по схемам звезда и треугольник, создал совершенный генератор трехфазного тока, трехфазный асинхронный двигатель и трехфазный трансформатор. Свои изобретения он демонстрировал на электротехнической выставке во Франкфурте-на-Майне в 1891 г. На этой же выставке им была осуществлена

первая в мире передача трехфазным током. Достоинство передачи электрической энергии переменным током связано с возможностью легко преобразовывать напряжение переменного тока с помощью трансформаторов, изобретенных Яблочковым (1876 г.) и И. Ф. Усагиным (1882 г.).

Введенный в употребление Доливо-Добровольским трехфазный ток и изобретенные им трехфазные трансформаторы, генераторы и двигатели трехфазного тока позволили широко применять электрическую энергию на фабриках и заводах.

После выставки во Франкфурте-на-Майне применение асинхронных двигателей и вообще трехфазного тока стало быстро распространяться сначала в Европе, а потом в Америке.

Подлинно мировая слава принадлежит гениальному представителю русской науки А. С. Попову — изобретателю радио. В изобретении Попова, имеющем колоссальное значение для всего человечества, с огромной силой и яркостью воплотились широта и мощь русского национального гения, многогранная творческая одаренность нашего народа. Слава Попова еще при его жизни разнеслась далеко за рубежами нашей Родины и способствовала утверждению мирового приоритета русской науки.

В кратком обзоре невозможно полностью осветить роль русских ученых в развитии электротехники.

Необходимо отметить исключительно тяжелые условия, в которых приходилось работать русским новаторам в царской России. Надо было обладать исключительной любовью к своему народу, исключительной настойчивостью и энергией, надо было многим жертвовать, чтобы сделать ценное открытие или изобретение в до-революционной России, когда ученые были окружены недоверием и на их работы не отпускалось никаких средств. Многие изобретения гибли в царской России или становились достоянием зарубежных фирм. Тяжелое прошлое русской науки навсегда осталось позади, впереди широкая дорога советской науки. Пусть наша советская молодежь смело и гордо идет по этой дороге вперед к все большим и большим завоеваниям, пусть своими трудами и изобретениями прославляет советскую науку, самую передовую науку в мире.

ГЛАВА 1

ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОНЯТИЯ

§ 1-1. ЗАКОН КУЛОНА

Механическое взаимодействие между наэлектризованными телами было установлено Кулоном, который нашел, что сила взаимодействия зависит от расстояния между телами и от величины их электрических зарядов. Позднейшие исследования показали, что на величину силы взаимодействия влияет также и среда, в которой наблюдается электрическое действие. Два электрических заряда взаимодействуют в любой изолирующей среде с силой меньшей, чем в пустоте.¹

Если обозначить заряды, сосредоточенные на двух телах, находящихся одно от другого на расстоянии l , через q_1 и q_2 , то закон Кулона выразится формулой²

$$f = k \frac{q_1 q_2}{l^2}, \quad (1-1)$$

где f — сила взаимодействия;

k — множитель, зависящий от выбора системы единиц измерения и от свойств среды, в которой расположены взаимодействующие заряды.

Величины, входящие в формулу (1-1), можно выразить как в абсолютной системе единиц (СГСЕ), так и в абсолютной практической системе (МКСА).

Если указанные величины выражены в системе СГСЕ, то формула (1-1) должна быть написана в виде

$$f = \frac{1}{\epsilon_r} \cdot \frac{q_1 q_2}{l^2} \text{ дин}, \quad (1-2)$$

¹ Под «пустотой» понимается пространство, находящееся в состоянии наивысшего разряжения (вакуума).

² Формула (1-1) строго справедлива для точечных зарядов, практически же она справедлива и для зарядов, сосредоточенных на телах, линейные размеры которых весьма малы по сравнению с расстоянием между ними.

³ Система единиц — см. § 1-4.

где ϵ_r называется относительной диэлектрической проницаемостью среды, в которой наблюдается электрическое взаимодействие между наэлектризованными телами. Для пустоты относительная диэлектрическая проницаемость принимается равной единице.

Если величины, входящие в формулу (1-1), выражены в единицах практической системы (МКСА), в которой единицей заряда служит 1 к, равный $3 \cdot 10^9$ единиц заряда (СГСЕ), единицей длины — 1 м = 100 см и единицей силы 1 н = 10^5 дн, то с целью придания более упрощенного начертания некоторым формулам, с которыми придется встретиться в дальнейшем, в знаменатель формулы (1-1) введен множитель 4π и эта формула выражена в виде

$$f = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2} \text{ н}, \quad (1-3)$$

где ϵ называется диэлектрической проницаемостью среды, в которой наблюдается электрическое взаимодействие. Как ϵ_r в формуле (1-2), так и ϵ в формуле (1-3) являются величинами, характеризующими среду, окружающую наэлектризованное тело, в отношении влияния этой среды на электрические взаимодействия.

Для определения соотношения между значениями относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r и диэлектрической проницаемости ϵ одной и той же среды положим, что два тела с зарядами соответственно Q_1 и Q_2 , выраженными в единицах системы (СГСЕ), находящиеся на расстоянии L см одно от другого в среде с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_r , взаимодействуют согласно формуле (1-2) с силой

$$F = \frac{1}{\epsilon_r} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{L^2} \text{ дн};$$

для определения силы взаимодействия между теми же телами по формуле (1-3) мы должны, очевидно, написать эту формулу в виде

$$F \cdot 10^{-5} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{\frac{Q_1}{3 \cdot 10^9} \cdot \frac{Q_2}{3 \cdot 10^9}}{\frac{L^2}{10^4}} \quad \text{или} \quad F = \frac{10^{-9}}{36\pi\epsilon} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{L^2}.$$

Из сопоставления выражений для F находим

$$\epsilon_r = \epsilon : \frac{10^{-9}}{36\pi}.$$

Величина $\frac{10^{-9}}{36\pi}$ обозначается ϵ_0 и называется электрической постоянной. Эта величина является размерной и измеряется в практи-

ческой системе единиц (МКСА), как увидим ниже, в кулон: вольт-метр (к/в·м).

Итак,

$$\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} \approx 8,86 \cdot 10^{-12} \text{ к/в·м.} \quad (1-4)$$

Обычно диэлектрическую проницаемость ϵ любого вещества принято сравнивать с электрической постоянной ϵ_0 . Отношение $\frac{\epsilon}{\epsilon_0}$ обозначают ϵ_r и называют, как мы уже знаем, относительной диэлектрической проницаемостью среды, являющейся отвлеченной (безразмерной) величиной.

Итак,

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad \text{и} \quad \epsilon = \epsilon_r \epsilon_0. \quad (1-5)$$

Значения относительной диэлектрической проницаемости для некоторых диэлектриков даны в табл. 1-1,

Таблица 1-1

Значения относительной диэлектрической проницаемости некоторых диэлектриков

Диэлектрики	ϵ_r
Пустота	1
Воздух	1,0006
Мрамор	8,3
Фарфор	6,0
Резина	3,0
Стекло	5,0
Слюда	6,0
Масло трансформаторное	2,2

Пример 1-1. Два изолированных небольших шаровых проводника, обладающие соответственно электрическими зарядами $0,3 \cdot 10^{-6}$ к и $0,4 \cdot 10^{-6}$ к, находятся в среде с относительной диэлектрической проницаемостью, равной 2, на расстоянии 5 см один от другого. Определить силу их взаимодействия.

Решение. Пользуясь формулой (1-3), находим

$$f = \frac{0,3 \cdot 10^{-6} \cdot 0,4 \cdot 10^{-12}}{4\pi \cdot 2 \cdot 8,86 \cdot 10^{-12} \cdot 0,05^2} \approx 0,216 \text{ н.}$$

§ 1-2. НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Электрический заряд изменяет свойства окружающего его пространства, создавая в нем электрическое поле.

Электрическое поле является одной из двух сторон единого электромагнитного (электрического и магнитного) поля, которое окружает находящиеся в движении элементарные частицы, обладающие зарядами. Электромагнитное поле представляет собой с о б ы й в и д м а т е р и и. Электрическое и магнитное поля тесно связаны друг с другом; движение электрических зарядов всегда сопровождается магнитными явлениями и, наоборот, электрические явления могут возникать как следствие процессов, относящихся к области магнитных явлений. Однако в некоторой области пространства, например в области н е п о д в и ж н ы х заряженных проводящих тел, обнаруживается только электрическое поле; в то же время вокруг неподвижных магнитов обнаруживается только магнитное поле. Это обстоятельство позволяет отдельно изучить поля — электрическое и магнитное.

О свойствах электрического поля в какой-либо его точке можно судить по величине силы f , которая будет действовать на пробный положительный заряд q_0 , помещенный в рассматриваемую точку поля. Частное от деления этой силы на величину пробного заряда равно напряженности электрического поля в данной его точке. Таким образом, используя формулу (1-3), приходим к выводу, что точечный заряд q создает вокруг себя поле, напряженность которого

$$E = \frac{f}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{q}{l^2}, \quad (1-6)$$

где l — расстояние от заряда q до точки наблюдения, т. е. той точки где определяется напряженность поля.

Напряженность поля в пустоте, электрическая постоянная которой ϵ_0 , соответственно выразится

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{l^2}. \quad (1-7)$$

Напряженность поля является величиной векторной, т. е. определяющейся не только своим численным значением, но и направлением. Направление вектора напряженности поля всегда совпадает с направлением силы, действующей на пробный положительный заряд. Этот заряд будет перемещаться, если он свободен, по некоторой линии, касательная к которой в каждой точке совпадает по направлению с вектором напряженности электрического поля в этой точке. Такая линия называется линией напряженности электрического поля.

Для определения напряженности поля, созданного не одним, а несколькими точечными зарядами, необходимо геометрически сло-