

## **Авторский коллектив**

**Кольниченко Георгий Иванович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизация технологических процессов, оборудование и безопасность производств» Мытищинского филиала Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана.

**Тарлаков Яков Викторович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов, оборудование и безопасность производств» Мытищинского филиала Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана.

**Сиротов Александр Владиславович** – доктор технических наук, старший научный сотрудник, заведующий кафедрой «Автоматизация технологических процессов, оборудование и безопасность производств» Мытищинского филиала Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана.

**Кравченко Игорь Николаевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Технический сервис машин и оборудования» Российского государственного аграрного университета – Московской сельскохозяйственной академии имени К. А. Тимирязева.

**Усачев Максим Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов, оборудование и безопасность производств» Мытищинского филиала Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана.

## Предисловие

Настоящий учебник предназначен для студентов высших учебных заведений неэлектротехнических специальностей, изучающих курс «Электротехника» в рамках бакалаврской, магистерской и инженерной подготовки.

Дисциплина «Электротехника» является важнейшей общетехнической дисциплиной в вузе, на базе которой осуществляется освоение последующих дисциплин, связанных с электромашиностроением, электроснабжением, промышленной электроникой, автоматизацией технологических процессов. Изучение электротехники – это основа подготовки специалистов, способных решать проблемы эффективного генерирования, распределения и использования электрической энергии.

Учебник «Основы электротехники и электроснабжения предприятий лесного комплекса» состоит из двух частей:

Часть 1. «Основы электротехники».

Часть 2. «Основы электроснабжения».

В части 1 рассматриваются вопросы, связанные с методами расчета электрических цепей постоянного и синусоидального тока при установившихся режимах их работы. В учебнике особое внимание уделено выработке навыков практических расчетов электрических цепей. Приведенные примеры и задания с развернутыми численными решениями необходимы для понимания и освоения других важных разделов электротехники и электроэнергетики, излагаемых во второй части книги.

Часть 2 включает в себя разделы, связанные с электрическими машинами и начальными сведениями об электроприводе, где дается представление об электрических станциях, электрических сетях и распределительных устройствах, энергосбережении и энергоэффективности.

На современном этапе развития цивилизации приоритетом в обеспечении энергетической и экологической безопасности является энергосбережение и повышение эффективности использования энергоресурсов и энергии, которые позволяют ослабить зависимость экономики и социальной сферы любой страны от объемов добычи или закупки энергетического сырья.

В России энергосбережение и повышение энергоэффективности объявлены важнейшими компонентами государственной политики. Проводниками такой политики в производстве и быту должны стать специалисты, обладающие соответствующими компетенциями и навыками, которые позволяли бы им не только решать сложные технологические и организационные проблемы, но и быть проводниками энергосберегающей идеологии, носителями высокой культуры потребления энергетических ресурсов и энергии.

Предлагаемый учебник разработан на основе Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования для студентов бакалавриата, обучающихся по направлению 35.03.02 «Технологии лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств» (направленность (профиль) подготовки «Лесоинженерное дело»).

## Введение

Электротехника – это наука, изучающая вопросы технического применения электрических и магнитных явлений во всех областях современной жизни.

В настоящее время нет ни одной области современного производства и отрасли народного хозяйства, культуры и быта, где бы ни использовалась электрическая энергия. Научно-технический прогресс немислим без электрификации.

Широкое и разнообразное применение электрической энергии объясняется ее ценными свойствами. Главное из них состоит в том, что электрическая энергия наиболее универсальна, так как сравнительно легко преобразовывается в другие виды энергии, а также относительно легко может быть получена из других видов энергии; кроме того, её можно производить в огромных количествах на мощных электростанциях; её можно делить на любые части в электрических цепях (мощность приемников электроэнергии может быть от долей ватта до мегаватт); процессы, в которых используется электроэнергия, лежат в основе автоматизации, управления и регулирования; электроэнергию можно передавать на огромные расстояния, что дает возможность строить электростанции в местах, где имеются большие запасы природных ресурсов, и передавать ее в места, где располагаются энергоемкие потребители.

Начало электротехники заложили ученые XVIII и XIX столетий, когда был сделан ряд важных открытий в области изучения электромагнетизма и изобретений, связанных с его применением.

Во второй половине XVIII в. были проведены значительные работы в области изучения электротехнических явлений академиками Петербургской академии наук М. В. Ломоносовым, Г. В. Рихманом и Т. У. Эпинусом, который был одним из пионеров идеи о существовании связей между электрическими и магнитными явлениями.

Количественные соотношения, характеризующие механические взаимодействия электрически заряженных тел и механические взаимодействия магнитных масс полюсов магнита, первым опубликовал в 1785 г. Кулон.

Серия важнейших изобретений и работ началась с 1820 г. после открытия датским ученым Х. К. Эрстедом влияния электрического тока на магнитную стрелку, чем подтверждался факт существования магнитного поля вокруг проводника с током.

Французский ученый Д. Ф. Араго с помощью создаваемого электрическим током магнитного поля намагнитил кусок стали, создав первый электромагнит со стальным сердечником (1824). Его соотечественник А. М. Ампер открыл явление механического взаимодействия токов и установил закон этого взаимодействия, положив таким образом начало электродинамике (1826).

В 1821 г. английский ученый М. Фарадей показал, что проводник с током вращается вокруг магнитного полюса. В том же году было открыто явление термоэлектричества, позволившее непосредственно превращать тепловую энергию в электрическую.

В 1827 г. немецким ученым Г. С. Омом было найдено соотношение между силой тока, электродвижущей силой и сопротивлением проводника, по которому проходит ток, то есть был открыт закон Ома.

Отметим, что после создания первого химического генератора электрического тока (А. Вольта, В. В. Петров) к концу первой трети XIX в. были обнаружены и в значительной мере изучены химические, тепловые, световые и магнитные действия тока, установлены важнейшие законы электрических цепей.

Теоретическим фундаментом для развития электротехники послужило открытие Фарадеем закона электромагнитной индукции (1831), а также работы Дж. К. Максвелла и Э. Х. Ленца. На основании теоретических и экспериментальных исследований этих ученых уже в XIX в. появились первые образцы электрических машин, трансформаторов, электрических ламп. Особенно большие заслуги в этой области принадлежат русским ученым и изобретателям.

В 1833 г. академиком Петербургской академии наук Э. Х. Ленцем было установлено правило, названное его именем; затем экспериментально обоснован закон Джоуля — Ленца (1842). Им же совместно с академиком Б. С. Якоби были разработаны методы расчетов электромагнитов и открыта обратимость электрических машин. Б. С. Якоби построил первый в мире электродвигатель (1834–1838), он же является создателем гальванопластики (1838), изобретателем первого буквопечатающего телеграфного аппарата (1850). В 1802 г. русским ученым В. В. Петровым была открыта электрическая дуга. Первое ее практическое применение для освещения было осуществлено П. Н. Яблочковым с помощью изобретенной им электрической «свечи» (1875). Затем электрическую дугу использовали для сварки и резания металлов, что было сделано также русскими изобретателями Н. Н. Бенардосом и Н. Г. Славяновым. П. Н. Яблочков предложил оригинальные конструкции машин постоянного и переменного тока. Первую в мире лампу накаливания изобрел П. А. Лодыгин.

Советский ученый С. Н. Вавилов разработал теорию, связанную с явлением люминесценции, и под его руководством была разработана технология производства ламп «дневного» света.

По мере расширения практического применения электроэнергии возникала необходимость в изыскании способов экономичной передачи электрической энергии на значительные расстояния. Следует отметить первые опыты по передаче электрической энергии (Ф. А. Пироцкий, 1874) и теоретические исследования (Д. А. Логинов, 1880; М. Дюпре, 1881), в которых обоснована возможность экономичной передачи энергии на большие расстояния за счет повышения напряжения, а также открытия вращающегося магнитного поля (Г. Феррарис, Н. Тесла, 1888).

Последнее десятилетие XIX в. ознаменовалось новым периодом в технике использования электрической энергии в промышленном производстве. Возникла новая область техники — электроэнергетика, родоначальником которой являлся выдающийся русский электротехник М. О. Доливо-Добровольский, работавший в 1888–1890 гг. трехфазную систему токов и построивший первый в мире трехфазный генератор переменного тока. Созданный им асинхронный короткозамкнутый электродвигатель переменного тока является и поныне ос-

новным типом электродвигателя. В тот же период времени М. О. Доливо-Добровольский создал трехфазный трансформатор, а также трехфазную систему передачи и распространения электрической энергии, которая до сих пор действует во всем мире.

К наступившему ХХI в. Россия являет собой мощную энергетическую державу. Без электроэнергии невозможна нормальная жизнь современного человека. Кроме того, непрерывное расширение области применения электрической энергии влечет за собой глубокое внедрение электротехники во все сферы жизнедеятельности человека.

Эти обстоятельства требуют обеспечения соответствующей профессиональной подготовки специалистов, которые должны обладать необходимой системой научных знаний, практических умений и производственных навыков в актуальных для них областях электротехники.

# Глава 1. Основы электростатики

## 1.1. Электрический заряд и электромагнитное поле элементарных частиц

В структуру атомов и молекул вещества входят элементарные частицы. Некоторые из них обладают электрическим зарядом. Для изучения электротехники необходимо ознакомиться с основными свойствами электронов и протонов.

**Протоны** – частицы, обладающие положительным электрическим зарядом. Они входят в состав атомного ядра, электрический заряд которого в целом положительный. Занимая незначительную долю объема, ядро содержит практически массу атома.

Вокруг ядра находятся **электроны** – частицы с отрицательным электрическим зарядом. Электроны вращаются вокруг собственной оси и вокруг ядра по замкнутым орбитам.

Элементарные частицы, обладающие электрическим зарядом, окружены электромагнитным полем, причем электрический заряд имеет лишь частица материи, сосредоточенная в весьма малой области пространства. Вне этой области материя существует в виде электромагнитного поля.

Элементарные заряженные частицы и их электромагнитное поле, как и другие виды материи, обладают массой, энергией, количеством движения, но они и их электромагнитное поле являются особым видом материи, так как, кроме перечисленных выше свойств, обладают еще и электромагнитными свойствами, которые в классической механике не учитываются. Важнейшим из этих свойств является электрический заряд и силовое воздействие электромагнитного поля на заряженные частицы.

Электрический заряд элементарной частицы является ее физическим свойством, которое характеризует связь частицы с собственным электромагнитным полем. Электромагнитное поле проявляется различно в зависимости от того, движется или неподвижна заряженная частица, с которой это поле связано и взаимодействует.

С этой точки зрения различают электрическое и магнитное поля.

**Электрическое поле** есть материя, которая окружает неподвижные заряженные частицы и неразрывно связана с ними. Характерным свойством электрического поля является силовое воздействие на неподвижные заряженные частицы, внесенные в область пространства, заполненную этим видом материи.

**Магнитное поле** есть материя, которая окружает движущиеся заряженные частицы и связана с ними. Характерным свойством магнитного поля является силовое воздействие на движущиеся заряженные частицы, внесенные в область пространства, заполненную этим видом материи. На неподвижные заряженные частицы магнитное поле не действует.

Следует отметить, что элементарную частицу, обладающую зарядом, нельзя мыслить без электромагнитного поля, а электромагнитное поле может суще-

ствовать в свободном состоянии, будучи отделенным от заряженной частицы. Таковым является фотон, а также электромагнитное поле, излученное антенной. Распространение электромагнитного поля сопровождается непрерывным взаимным превращением магнитного и электрического полей. Эти два процесса неотделимы друг от друга. Скорость распространения электромагнитного поля в пустоте составляет около 300 000 километров в секунду (т. е.  $3 \cdot 10^8$  м/с), т. е. равна наивысшей допустимой в природе скорости – скорости света.

Пустотой называется область пространства, в которой отсутствуют частицы вещества, но существует электромагнитное поле или другие поля (например, поле тяготения).

Итак, для выявления электрического поля необходимо взять *неподвижное* заряженное тело, так как на движущееся заряженное тело действует не только электрическое, но и магнитное поле.

Простейшим случаем электрического поля является поле неподвижных электрически заряженных тел. Такое поле называется электростатическим. Раздел науки, в котором изучают электростатические поля и их проявления, называется электростатикой.

## 1.2. Проводники, диэлектрики, полупроводники

При исследовании электрического поля в веществе необходимо учитывать электрические свойства вещества. Наименьшая частица вещества, которая сохраняет его свойства, называется молекулой, которая является комбинацией двух или более атомов.

Атом – это наименьшая частица элемента, которая сохраняет его химические характеристики.

Атом состоит из протонов, нейтронов и электронов. Протоны и нейтроны сгруппированы в центре атома и образуют ядро. Протоны заряжены положительно, а нейтроны не имеют электрического заряда. Электроны расположены на оболочках на различных расстояниях от ядра.

Количество электронов различных химических элементов не одинаково. Например, атом самого легкого элемента – водорода – имеет один электрон, а атом натрия – 11 электронов, а в атоме тяжелого элемента – урана – 92 электрона.

Общий отрицательный заряд электронов в атоме любого химического элемента равен положительному заряду ядра, поэтому атомы в обычном состоянии электрически нейтральны.

После удаления из атома или введения в него одного или нескольких элементов атом становится электрически заряженным, причем заряд его всегда оказывается кратным заряду электрона. Это объясняется тем, что электрон обладает элементарным (наименьшим известным) электрическим зарядом, равным  $1,6 \cdot 10^{-19}$  кулона (К).

Недостаток электронов делает атом положительно заряженным, избыток электронов обуславливает общий его отрицательный заряд. То же самое можно

сказать о группе взаимосвязанных атомов, образующих молекулу. Атомы и молекулы, обладающие электрическим зарядом, называются и о н а м и.

Количество протонов в ядре атома называется атомным номером элемента, то есть номером элемента в периодической таблице Д. И. Менделеева. Атомные номера позволяют отличить один элемент от другого.

Каждый элемент имеет также атомную массу. Атомная масса определяется общим числом протонов и нейтронов в ядре. Электроны почти не дают вклада в общую массу атома; масса электрона составляет лишь  $1/1836$  часть от массы протона, и этого недостаточно, чтобы ее учитывать.

Электроны вращаются вокруг ядра не произвольно, а по определенным (разрешенным) орбитам.

Находясь на одной из них, электрон обладает определенной энергией или, иначе говоря, занимает определенный энергетический уровень.

Возможен переход электрона с одной разрешенной орбиты на другую, в этом случае его энергия изменяется скачкообразно.

При переходе на более удаленную от ядра орбиту потенциальная энергия электрона повышается, так как такой переход совершается с преодолением сил притяжения электрона к ядру за счет энергии, поступившей извне (под действием тепла, света и т. п.).

Положение электрона в атоме на более удаленной орбите менее устойчиво. Атом, получивший порцию энергии, за счет которой электрон перешел с более устойчивой орбиты на менее устойчивую, называется в о з б у ж д е н н ы м.

Возбужденное состояние атома продолжается кратковременно (примерно  $10^{-8}$  с), затем электрон перескакивает на одну из свободных орбит, более близких к ядру. При этом уровень энергии электрона понижается, а избыток энергии выделяется в виде электромагнитного излучения. Таким образом, поглощение и испускание энергии электроном осуществляется только порциями (квантами).

Электроны, характеризующиеся более высоким энергетическим уровнем (более удаленные от ядра), менее прочно связаны с ядром.

Электроны наружного слоя участвуют в образовании химических связей, т. е. атом может отдать электроны из своего наружного слоя, становясь положительным ионом, или, наоборот, присоединить электроны к наружному слою, становясь отрицательным ионом. Такие электроны называются валентными.

Валентные электроны в основной зоне занимают более высокие уровни энергии, они слабо связаны с ядрами и поэтому, как было сказано раньше, могут выходить из состава атомов.

При увеличении энергии валентный электрон приобретает такое энергетическое состояние, когда он не связан с ядром какого-либо одного атома, а переходит от одного атома к другому. Такие электроны принято называть свободными. Из энергетических уровней свободных электронов образуется энергетическая зона свободных электронов.

Свободные электроны при определенных условиях участвуют в образовании электрического тока, в связи с чем энергетическая зона свободных электронов называется зоной проводимости.



Валентным или свободным может стать любой электрон, если его энергия достигла значения, соответствующего одному из энергетических уровней той или другой зоны.

Вещества по их электрическим свойствам могут быть разделены на три основных класса:

- проводники (проводящие вещества);
- диэлектрики (изолирующие вещества);
- полупроводники (полупроводящие вещества).

Проводящими веществами являются такие, в которых в значительном количестве существуют обладающие электрическим зарядом свободные элементарные частицы (электроны или положительные и отрицательные ионы), приходящие в упорядоченное движение под действием электрического поля и тем самым образующие в веществе упорядоченный электрический ток. К проводящим веществам, прежде всего, относятся все металлы, обладающие электропроводностью, т. е. свойством проводить электрический ток под действием электрического поля. Она обусловлена наличием свободных электронов, т. е. электронов, слабо связанных с атомами, легко переходящими от атома к атому и образующими при упорядоченном движении электрический ток в металле. Самой высокой проводимостью среди металлов обладает серебро, далее в порядке убывания проводимости идут медь, золото и алюминий. И серебро, и медь, и золото имеют валентность, равную единице. Однако серебро является лучшим проводником, поскольку его свободные электроны более слабо связаны.

Значительной электропроводностью обладают также электролиты – растворы солей, оснований и кислот.

Способность проводить ток проявляют также газы в ионизированном состоянии.

Диэлектриками являются вещества, в которых обладающие зарядом свободные частицы имеются в практически ничтожном количестве вследствие того, что валентные электроны одних атомов присоединяются к другим атомам, заполняя их валентные оболочки и препятствуя таким образом образованию свободных электронов. Диэлектрики препятствуют проникновению электричества и потому служат изолирующей средой. К диэлектрикам относятся различные пластмассы, слюда, фарфор, стекло, мрамор, резина, различные смолы, лаки и другие материалы.

Полупроводящими веществами являются вещества, занимающие по значению своей электропроводности промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Им присущ ряд характерных свойств, связанных с существованием в них не только электропроводности, обусловленной свободными электронами (электронами проводимости), но также электропроводности, обусловленной перемещением под действием электрического поля так называемых дырок, т. е. незанятых валентными электронами мест в атомах. Перемещение в веществе от атома к атому этих незанятых электронами мест по существу является результатом перемещения одного за другим валентных электронов. Такое перемещение дырок эквивалентно по своему результату движе-

нию положительно заряженных частиц с зарядом, равным по абсолютной величине заряду электрона. Именно наличие полупроводников с различными типами электропроводности – электронной или n-типа (negativ) и дырочной или p-типа (positiv) – открывает возможности создания большой группы полупроводниковых приборов, обладающих весьма важными характеристиками.

К полупроводниковым веществам относится ряд элементов, таких как германий (Ge), кремний (Si), селен (Se), а также ряд сплавов и окислов. В них возникает электронно-дырочная проводимость, т. е. движение под действием внешнего электрического поля электронов в зоне проводимости в одном направлении и дырок в валентной зоне в другом направлении. Но особенно ценной является возможность путем внедрения примесей придать полупроводнику преимущественно электронную или преимущественно дырочную проводимость.

### 1.3. Закон Кулона. Напряженность электрического поля

Обычным состоянием окружающих нас тел является состояние электрически нейтральное, хотя они и состоят из частиц, обладающих электрическим зарядом. Это объясняется равенством общего положительного заряда ядер атомов общему отрицательному заряду электронов.

Тело может получить электрический заряд в результате какого-либо процесса, который приведет к неравенству в объеме тела (или части его) положительного и отрицательного заряда. В том и другом случае заряженные частицы не пропадают, а передаются от одного тела другому или перемещаются в данном теле, т. е. происходит разделение положительно и отрицательно заряженных частиц.

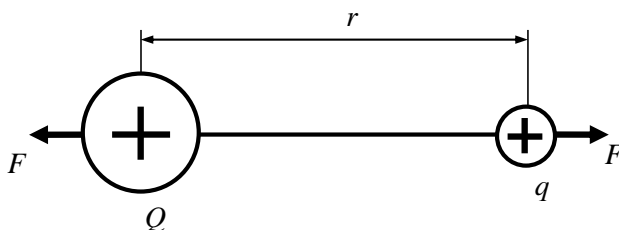


Рис. 1.1. Взаимодействие двух точечных заряженных тел

Электризация тел может быть осуществлена трением, электростатической индукцией или в результате других физических и химических процессов. Некоторые из них будут рассмотрены далее.

Неподвижное тело, обладающее электрическим зарядом, так же как и неподвижная элементарная заряженная частица, окружено электрическим полем. Электрическое поле неподвижного заряженного тела (частицы) называется электростатическим.

Отмеченное ранее свойство электрического поля – силовое действие на неподвижные заряженные частицы и тела – используется с целью его обнаружения и изучения. Для этого нужно поместить в пространство, окружающее те-

ло с зарядом  $Q$ , другое тело с зарядом  $q$  (рис. 1.1). Будем называть первое тело вместе с его полем исследуемым, а второе тело – пробным.

Опыт показывает, что на каждое из двух заряженных тел действуют одинаковые силы  $F$ , направленные так, что тела с зарядами одного знака отталкиваются, а тела с зарядами разных знаков притягиваются.

*Закон Кулона гласит: сила воздействия двух точечных зарядов прямо пропорциональна произведению этих зарядов, обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними и направлена по линии, соединяющей эти заряды. Для вакуума этот закон имеет вид*

$$F = \frac{Q \cdot q}{4\pi\epsilon_0 r^2}, \quad (1.1)$$

где  $Q$  и  $q$  – величины зарядов точечных тел;

$r$  – расстояние между их центрами;

$\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$  – коэффициент пропорциональности, значение которого определяется выбором системы единиц.

Величина  $\epsilon_0$  в знаменателе этого коэффициента называется электрической постоянной, которая в системе (СИ) имеет значение:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{фарада}}{\text{метр}} \left[ \frac{\phi}{\text{м}} \right] F = \frac{Q \cdot q}{4\pi\epsilon_0 r^2}. \quad (1.2)$$

Другие величины, входящие в формулу (1.1), имеют следующие единицы измерения:  $F$  – ньютон [н]; количество электричества  $q$  – кулон [к].

В диэлектрике силы взаимодействия двух точечных зарядов равны:

$$F' = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r^2}, \quad (1.3)$$

где  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость диэлектрика. Она показывает, во сколько раз сила кулоновского взаимодействия зарядов в диэлектрике меньше, чем в вакууме.

Предположим, что размеры пробного тела и его заряд  $q$  столь малы, что заряд  $Q$  исследуемого тела и его электрическое поле не изменяются, т. е. остаются такими же, как и в случае уединения. Пробное тело при этом может рассматриваться лишь как «инструмент» для регистрации механической силы.

Помещая пробное заряженное тело в различные точки, получаем возможность исследовать интенсивность электрического поля.

Согласно закону Кулона, сила пропорциональна величине пробного заряда. В связи с этим интенсивность электрического поля в данной точке удобно оценить величиной силы, приходящейся на единицу положительного заряда пробного тела, которая называется **напряженностью** электрического поля.

Напряженность электрического поля – векторная величина. Направление вектора  $\vec{E}$  совпадает с направлением вектора силы  $\vec{F}_1$ , действующей на положительный пробный заряд, помещенный в данную точку поля. Напряженность не зависит от наличия или отсутствия в данном поле пробных зарядов. Она за-

висит от свойств самого поля, которые определяются зарядом – источником, расстоянием от него до точки поля, в которой измеряется, напряженностью и средой, в которой создано поле. В системе СИ напряженность электрического поля измеряется в *вольтах на метр* [В/м].

Имея в виду формулу (1.1), вычислим напряженность поля, создаваемого зарядом  $Q$ :

$$E = \frac{F}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}. \quad (1.4)$$

Если заряд  $Q$  окружает среда с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ , то напряженность создаваемого поля:

$$E' = \frac{F'}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r^2}. \quad (1.5)$$

Графически электрическое поле изображается *силовыми линиями*. Силовые линии начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных или уходят в бесконечность. На рис. 1.2 изображены линии напряженности полей положительного заряда (рис. 1.2а) и отрицательного (рис. 1.2б). На рис. 1.3а изображены силовые линии поля для системы положительного и отрицательного заряда, на рис. 1.3б – системы из двух положительных зарядов.

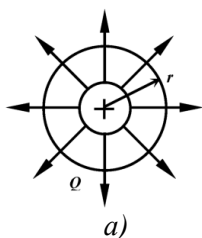
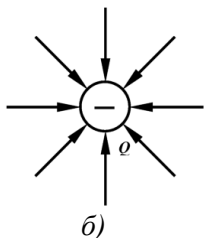
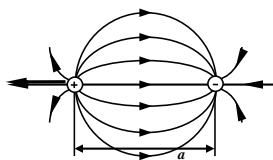


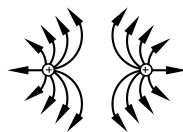
Рис. 1.2. Линии напряженности электрического поля точечного заряженного тела



б)



а)



б)

Рис. 1.3. Линии напряженности электрического поля группы из двух точечных заряженных тел

Вектор напряженности направлен по касательной к линиям напряженности. Электрическое поле, напряженность которого в каждой точке одинакова по величине и направлению, называется *однородным*. Силовыми линиями однородного поля являются параллельные прямые, расположенные на одинаковом расстоянии друг от друга. Из рис. 1.2 и 1.3 видно, что электрическое поле заряда  $Q$  является неоднородным.

Опыт показывает, что если на электрический заряд  $q$  одновременно действуют электрические поля нескольких зарядов, то результирующая сила оказывается равной геометрической сумме сил, действующих со стороны каждого поля в отдельности. Это означает, что электрические поля подчиняются принципу суперпозиций: если в данной точке пространства различные заряды создают электрические поля с напряженностью  $\vec{E}_1$ ,  $\vec{E}_2$  и т. д., то вектор напряженности электрического поля в этой точке равен сумме векторов напряженности всех электрических полей.

## 1.4. Электрический потенциал, напряжение и электродвижущая сила (ЭДС)

Рассмотрим свободную частицу с положительным зарядом  $Q$  в равномерном электрическом поле. Эта частица будет перемещаться в направлении действующей на нее со стороны поля силы  $F$ . При перемещении частицы на пути  $l$  между точками 1 и 2 совершается работа:

$$A_{12} = Fl = EQl,$$

где  $E$  – напряженность поля.

Работа считается положительной, если заряженная частица перемещается по направлению сил поля. Если перемещение вызывается действием посторонних сил против направления сил электрического поля, работа считается отрицательной.

Аналогичные выводы можно сделать и для неравномерного поля, определяя работу при перемещении заряженной частицы между точками 1 и 2 как сумму элементарных значений работы  $dA$ , совершаемой на каждом бесконечно малом отрезке пути  $dl$ , в пределах которого напряженность поля можно считать постоянной:

$$A_{12} = Q \int_1^2 E_n dl,$$

где  $E_n$  – проекция вектора напряженности поля на направление движения заряда.

Величина работы, которая совершается силами поля при перемещении заряженной частицы с произвольным зарядом, не может служить характеристикой поля, так как она зависит не только от напряженности поля, но и от заряда частицы.

С энергетической точки зрения электрическое поле характеризуется отношением работы к величине заряда перемещаемой частицы:

$$\frac{A_{12}}{Q} = U_{12}.$$

Это отношение для данного поля является постоянным и называется электрическим напряжением.

*Электрическое напряжение есть энергетическая характеристика поля вдоль рассматриваемого пути из одной точки в другую, которой оценивается возможность совершения работы при перемещении заряженных частиц между этими точками.*

Нетрудно найти связь напряженности равномерного поля с напряжением между двумя любыми точками:

$$U = \frac{A}{Q} = \frac{EQl}{Q}; \quad U = El. \quad (1.6)$$

Учитывая, что работа, совершаемая при перемещении заряженной частицы в электрическом поле, зависит от положения начальной и конечной точек пути, для расчетов можно ввести энергетическую характеристику поля в каждой точке, численное значение которой является функцией положения точки. Такой

характеристикой является электрический потенциал  $\phi$ . Потенциал не зависит от величины заряда, внесенного в данную точку поля, и определяется свойствами самого поля. Величина напряженности электрического поля, создаваемого зарядом или группой зарядов, убывает по мере удаления от этих зарядов и на бесконечности стремится к нулю. Поэтому при решении задач о потенциалах обычно за нулевой принимают потенциал точки, бесконечно удаленной от зарядов, или же потенциал Земли. Отсюда следует определение для потенциала поля, убывающего в бесконечности: *потенциал – величина, численно равная работе поля по перемещению единичного заряда из данной точки в бесконечность*. Физический смысл имеет не сам потенциал, а разность потенциалов. Связано это с тем, что потенциал любой точки поля может быть принят за нулевой.

В рассматриваемом нами примере частица, обладающая зарядом  $Q$ , испытывает воздействие силы  $F$  со стороны электрического поля, то есть эта частица обладает потенциальной энергией. В точке 1 эта энергия равна  $A_1$ . При перемещении ее из точки 1 в точку 2 совершается работа  $A_{12}$ , связанная с действием той же силы  $F$ .

Работу  $A_{12}$  нужно рассчитывать как убыль потенциальной энергии заряженной частицы при перемещении ее между указанными точками.

Следовательно, потенциальная энергия в точке 2:

$$A_2 = A_1 - A_{12}.$$

Отношение потенциальной энергии заряженной частицы, помещенной в данную точку электрического поля, к величине ее заряда называется *электрическим потенциалом поля* в этой точке:

$$\phi_1 = \frac{A_1}{Q}; \quad \phi_2 = \frac{A_2}{Q}.$$

Напряжение между двумя точками электрического поля равно разности потенциалов поля в этих точках:

$$U_{12} = \phi_1 - \phi_2. \quad (1.7)$$

Таким образом, *напряжение – это разность потенциалов двух точек, численно равная работе, которая производится при перемещении единицы положительного заряда (одного кулона) между двумя точками электрического поля* (например, между двумя точками электрической цепи).

Единицей измерения потенциала и напряжения служит вольт [В]. 1 вольт – это напряжение между двумя точками цепи, когда при перемещении заряда в 1 кулон совершается работа в 1 джоуль:

$$U = \frac{A}{Q} \text{ [В]}, \quad (1.8)$$

$$\text{т. е. Вольт} = \frac{\text{Джоуль}}{\text{Кулон}}.$$

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)