

## 2. Постоянный ток и энергия

### 2.1. Ток в электрической цепи

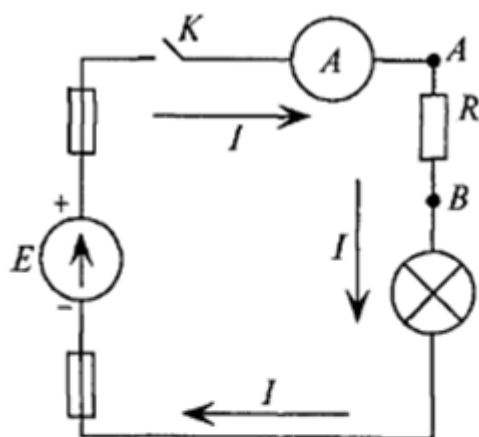


Рис. 2.1

*Электрический ток — это явление упорядоченного (направленного) перемещения заряженных частиц в проводнике под действием электрического поля.*

*Электрический ток может существовать только в замкнутой электрической цепи (ключ  $K$  замкнут — рис. 2.1).*

*Интенсивность направленного перемещения электрических зарядов в замкнутой электрической цепи характеризует величину тока.*

Обозначается величина постоянного тока буквой  $I$ , а переменного —  $i$  (мгновенное значение). Величина тока  $I$  определяется количеством электричества (зарядов)  $Q$ , проходящим через поперечное сечение проводника в единицу времени  $t$ :

$$I = \frac{Q}{t}, \quad i = \frac{dQ}{dt}. \quad (2.1)$$

Измеряется ток в амперах, т. е.  $[I] = \left[ \frac{Q}{t} \right] = \frac{\text{Кл}}{\text{с}} = \text{А}$  (ампер) — единица измерения тока.

Постоянным называется ток, величина и направление которого не изменяется с течением времени. Постоянный ток  $I'$  изобра-

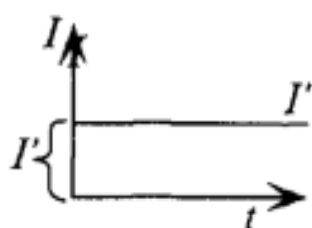


Рис. 2.2

жен на графике (рис. 2.2).

За направление тока в замкнутой электрической цепи принимается направление от положительной клеммы источника к его отрицательной клемме по внешнему участку цепи (рис. 2.1).

Таким образом, направление тока противоположно направлению перемещения электронов в замкнутой цепи. Ток в цепи направлен так, как перемещались бы положительные заряды.

В неразветвленной электрической цепи (рис. 2.1) ток на всех участках (во всех сечениях) цепи имеет одинаковое значение, в противном случае в какой-либо точке электрической цепи накапливались бы заряды, чего не может быть в замкнутой электрической цепи.

Отношение величины тока в проводнике  $I$  к площади его поперечного сечения  $S$  характеризует плотность тока в этом проводнике. Обозначается плотность тока буквой  $J$ .

$$J = \frac{I}{S}. \quad (2.2)$$

Единицей измерения плотности тока является ампер на квадратный метр

$$[J] = \left[ \frac{I}{S} \right] = \text{А/м}^2.$$

Так как на практике площадь сечения проводов обычно выражают в  $\text{мм}^2$ , то плотность тока выражают  $[J] = \text{А/мм}^2$ .

Плотность тока — величина векторная. Вектор плотности тока направлен перпендикулярно площади сечения проводника.

Допустимая плотность тока определяет способность проводника определенного сечения выдерживать ту или иную токовую нагрузку. Так, например, допустимая плотность тока для монтажных проводов  $[J] = (6 \div 8) \text{ А/мм}^2$ . По допустимой плотности тока определяют сечение проводов коротких линий и проверяют сечение проводов длинных линий, рассчитанных по допустимой потере напряжения. Допустимая плотность тока в проводах из различного материала и различных марок при разных условиях монтажа приводится в справочной литературе (Приложение 11).

### 2.3. ЭДС и напряжение в электрической цепи

Источник электрической энергии осуществляет направленное перемещение электрических зарядов по всей замкнутой цепи (рис. 2.3).

(рис. 2.3).

Энергия  $W$ , которую затрачивает или может затратить источник на перемещение единицы положительного заряда по всей замкнутой цепи, характеризует электродвижущую силу источника  $E$  (ЭДС):

$$E = \frac{W_{\text{ист}}}{q}.$$

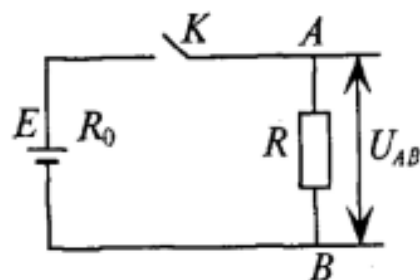


Рис. 2.3

Из определения следует, что ЭДС является энергетической характеристикой источника тока, а не силовой, как можно было бы решить по названию «электродвижущая сила». Единицей измерения ЭДС является вольт:

$$[E] = \left[ \frac{W}{q} \right] = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В (вольт)}.$$

Энергия, затраченная на перемещение единицы положительного заряда на каком-либо участке замкнутой цепи, характеризует напряжение или падение напряжения на этом участке (внутреннем или внешнем):

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{q}.$$

Для замкнутой электрической цепи условие равновесия напряжений

$$E = U_0 + U. \quad (2.3)$$

Таким образом, ЭДС источника ( $E$ ) можно рассматривать как сумму падений напряжения на внутреннем ( $U_0$ ) и на внешнем ( $U$ ) участках замкнутой цепи (рис. 2.3).

#### 2.4. Закон Ома для участка цепи

Закон Ома для участка электрической цепи устанавливает зависимость между током, напряжением и сопротивлением на этом участке цепи.

Направленное перемещение электрических зарядов в проводнике (т. е. электрический ток  $I$ ) происходит под действием сил однородного электрического поля (рис. 2.4). Напряженность поля определяется из выражения (1.13)

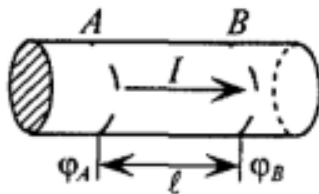


Рис. 2.4

$$E = \frac{U_{AB}}{l},$$

где  $U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$  — напряжение на участке проводника длиной  $l$ .

Плотность тока в проводнике пропорциональна напряженности однородного электрического поля, силы которого направленно перемещают в нем заряды:

$$J = \gamma E, \quad (2.4)$$

где  $\gamma$  — коэффициент пропорциональности, называемый удельной проводимостью, характеризующий способность проводника проводить электрический ток.

Подставив в выражение (2.4) величину напряженности однородного электрического поля, силы которого перемещают заряды в проводнике, получим

$$\frac{I}{S} = \gamma \frac{U_{AB}}{l} \quad \text{или} \quad I = \frac{U_{AB}}{\frac{l}{\gamma S}},$$

где  $\frac{\ell}{\gamma S}$  — электрическое сопротивление участка проводника ( $R_{AB}$ ) длиной  $\ell$ ,  $R_{AB} = \frac{\ell}{\gamma S}$ .

Тогда

$$I = \frac{U_{AB}}{R_{AB}}. \quad (2.5)$$

Это и есть математическое выражение закона Ома для участка  $AB$  электрической цепи.

Таким образом, ток на участке электрической цепи пропорционален напряжению на этом участке и обратно пропорционален сопротивлению этого участка.

Закон Ома для участка цепи позволяет определить напряжение на данном участке

$$U_{AB} = I R_{AB}, \quad (2.6)$$

а также вычислить сопротивление участка электрической цепи

$$R_{AB} = \frac{U_{AB}}{I}. \quad (2.7)$$

Выражения (2.6) и (2.7) являются арифметическими следствиями закона Ома, которые широко применяются для расчета электрических цепей.

## 2.5. Электрическое сопротивление

Как уже говорилось, обозначается электрическое сопротивление буквой  $R$ . Единицей измерения сопротивления является Ом:

$$[R] = \text{Ом}.$$

*Электрическое сопротивление проводника — это противодействие, которое атомы или молекулы проводника оказывают направленному перемещению зарядов.*

Сопротивление  $R$  зависит от длины проводника  $\ell$ , площади поперечного сечения  $S$  и материала проводника  $\rho$ :

$$R = \rho \frac{\ell}{S}, \quad (2.8)$$

где  $\rho = \frac{1}{\gamma}$  — удельное сопротивление проводника, зависящее от свойства материала проводника.

Удельное сопротивление ( $\rho$ ) — это сопротивление проводника из данного материала длиной 1 м площадью поперечного сечения 1 мм<sup>2</sup> при температуре 20 °С. Величина удельного со-

противления некоторых проводников приведена в Приложении 4.

Единицей измерения удельного сопротивления является

$$[\rho] = \text{Ом} \cdot \text{м},$$

поскольку

$$[\rho] = \left[ \frac{RS}{\ell} \right] = \frac{\text{Ом} \cdot \text{м}^2}{\text{м}}.$$

Однако на практике сечение проводников выражают в  $\text{мм}^2$ . Поэтому  $[\rho] = \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ .

Удельное сопротивление проводника определяет область его применения. Так, например, для соединения источника с потребителем применяются металлические провода с малым удельным сопротивлением — алюминий, медь. Для обмоток реостатов нагревательных приборов применяются сплавы с большим удельным сопротивлением — нихром, фехраль (при этом уменьшается длина проводника  $\ell = \frac{RS}{\rho}$ ).

Величину, обратную сопротивлению, называют проводимостью

$$g = \frac{1}{R}.$$

Единицей проводимости является сименс

$$[g] = \text{См (сименс)}.$$

Элементы электрической цепи, характеризующиеся сопротивлением  $R$ , называют резистивными, а промышленные изделия, предназначенные для выполнения роли сопротивления электрическому току, называются резисторами. Резисторы бывают регулируемые и нерегулируемые, проволочные и непроволочные, пленочные, композиционные и др.

Сопротивление проводников зависит от их температуры.

Сопротивление проводника при любой температуре (с достаточной степенью точности при изменении температуры в пределах  $0 \div 100^\circ\text{C}$ ) можно определить выражением

$$R_2 = R_1 + R_1 \alpha (t_2 - t_1), \quad (2.9)$$

где  $R_2$  — сопротивление проводника при конечной температуре  $t_2$ ;  $R_1$  — сопротивление проводника при начальной температуре  $t_1$ ;  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления.

Температурный коэффициент сопротивления определяет относительное изменение сопротивления проводника при изменении



его температуры на  $1^\circ\text{C}$ . Единицей измерения температурного коэффициента сопротивления является

$$[\alpha] = \frac{1}{^\circ\text{C}} = ^\circ\text{C}^{-1}.$$

Для различных проводников температурный коэффициент сопротивления имеет различные значения (Приложение 4).

Для металлических проводников (Приложение 4) температурный коэффициент сопротивления  $\alpha$  положителен, т. е. с ростом температуры сопротивление металлических проводников увеличивается (2.9). Объясняется это тем, что при нагревании увеличивается подвижность атомов и молекул металла, а следовательно, и число столкновений с ними электрических зарядов увеличивается. Таким образом, возрастает противодействие направленному перемещению этих зарядов, т. е. увеличивается сопротивление металлического проводника.

Для проводников второго рода (электролитов) и угля температурный коэффициент сопротивления  $\alpha$  отрицателен, т. е. с ростом температуры их сопротивление уменьшается (2.9). Объясняется это тем, что с повышением температуры ослабляются связи между положительно и отрицательно заряженными частицами, что приводит к усилению ионизации, обуславливающей электропроводность, т. е. уменьшается сопротивление электролитов и угля.

Для большинства электролитов  $\alpha \approx -0,02^\circ\text{C}^{-1}$ , а для угля  $\alpha = -0,005^\circ\text{C}^{-1}$ .

Температурный коэффициент сопротивления  $\alpha$  проводников определяет их применение. Например, такие сплавы, как константан и манганин, имеют малый температурный коэффициент сопротивления (Приложение 4), т. е. их сопротивление почти не зависит от температуры, поэтому их применяют в качестве материала для изготовления шунтов и добавочных сопротивлений, служащих для расширения пределов измерения амперметров и

вольтметров, на точность которых не должна влиять температура.

При понижении температуры некоторых металлов и сплавов до очень низких значений, порядка нескольких градусов Кельвина ( $0^\circ\text{K} \approx -273^\circ\text{C}$ ), возникает явление сверхпроводимости.

*Сверхпроводником называют проводник, сопротивление которого практически равно нулю.*

В сверхпроводнике совершенно не выделяется тепло при прохождении тока, так как электроны при направленном движении не встречают препятствий. В нем невозможно существование магнитного поля.

Следует ожидать широкого применения сверхпроводников в электротехнике в будущем.

## 2.6. Закон Ома для замкнутой цепи

Для замкнутой электрической цепи (рис. 2.5) ЭДС источника, согласно (2.3), можно определить выражением

$$E = U_0 + U = IR_0 + IR = I(R_0 + R), \quad (2.10)$$

где  $R_0$  — сопротивление источника;  $R$  — сопротивление потребителя (сопротивлением проводов пренебрегают).

Из (2.10) следует, что ток в замкнутой цепи равен

$$I = \frac{E}{R_0 + R}. \quad (2.11)$$

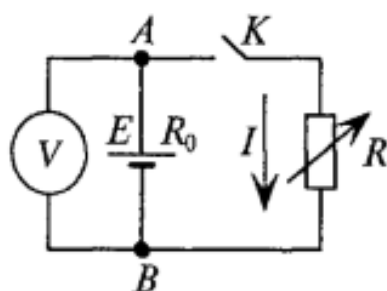


Рис. 2.5

Выражение (2.11) является математическим выражением закона Ома для замкнутой цепи.

Из (2.10) можно определить напряжение на внешнем участке цепи, т. е. напряжение на клеммах источника  $U$  между точками  $A$  и  $B$  (см. рис. 2.5).

$$U = E - U_0 = E - IR_0. \quad (2.12)$$

Таким образом, напряжение  $U$  на клеммах источника электрической энергии меньше, чем ЭДС этого источника ( $E$ ) на величину падения напряжения  $U_0$  на внутреннем сопротивлении источника.

Отсутствие нагрузки — ключ  $K$  разомкнут — соответствует режиму холостого хода. При этом  $IR_0 = 0$ . Вольтметр ( $V$ ), подключенный к клеммам источника  $A$  и  $B$  (рис. 2.5), при отсутствии нагрузки ( $I = 0$ ) показывает ЭДС источника  $E$

$$U = E - IR_0 = E - 0 = E.$$

Если же ключ  $K$  замкнут ( $I \neq 0$ ), то вольтметр покажет напряжение  $U$  на клеммах источника, которое меньше ЭДС на величину  $U_0 = IR_0$ , равную падению напряжения на внутреннем сопротивлении источника (2.12).

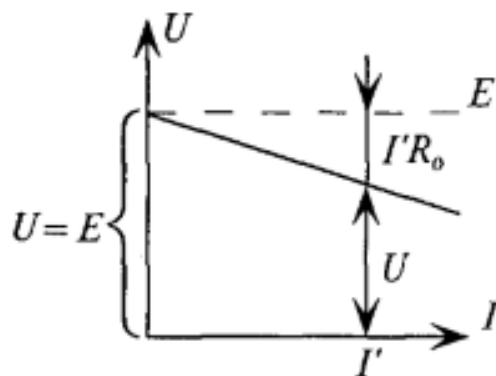


Рис. 2.6

Из (2.12) следует, что с увеличением нагрузки, т. е. с увеличением тока  $I$ , напряжение на клеммах источника уменьшается, что можно показать графически на внешней характеристике источника (рис. 2.6).

Очевидно, чем больше внутреннее сопротивление источника  $R_0$ , тем меньше будет напряжение на его клеммах при нагрузке  $I'$ .

## 2.7. Энергия и мощность электрического тока

В замкнутой электрической цепи источник затрачивает электрическую энергию  $W_{\text{ист}}$  на перемещение единицы положительно заряда по всей замкнутой цепи, т.е. на внутреннем и внешнем участках ((2.3) и рис. 2.3).

$$E = U + U_0.$$

ЭДС источника определяется выражением  $E = \frac{W_{\text{ист}}}{q}$ . Из этого выражения следует, что энергия, затраченная источником, равна

$$W_{\text{ист}} = Eq = EIt, \quad (2.13)$$

так как  $q = It$ , что вытекает из определения величины тока  $I = \frac{q}{t}$ .

Энергия источника расходуется на потребителе (полезная энергия)

$$W = Uq = UIt \quad (2.14)$$

и на внутреннем сопротивлении источника (потери)

$$W_0 = U_0q = U_0It. \quad (2.15)$$

Потерей энергии в проводах, при незначительной их длине, можно пренебречь.

Из закона сохранения энергии следует

$$W_{\text{ист}} = W + W_0. \quad (2.16)$$

Во всех элементах электрической цепи происходит преобразование энергии (в источниках различные виды энергии преобразуются в электрическую, в потребителях — электрическая в другие виды энергии).

Скорость такого преобразования энергии определяет электрическую мощность элементов электрической цепи

$$P = \frac{W}{t}. \quad (2.17)$$

Обозначается электрическая мощность буквой  $P$ , а единицей электрической мощности является ватт, другими словами,  $[P] = \text{Вт (ватт)}$

$$[P] = \left[ \frac{W}{t} \right] = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{с}} = \text{Вт}.$$

Таким образом, мощность источника электрической энергии определяется выражением

$$P_{\text{ист}} = \frac{W_{\text{ист}}}{q} = \frac{EIt}{t} = EI. \quad (2.18)$$

Мощность потребителя, т.е. полезная, потребляемая мощность, будет равна



$$P = \frac{W}{q} = \frac{UIt}{t} = UI. \quad (2.19)$$

Если воспользоваться законом Ома для участка электрической цепи, то полезную мощность можно определить следующим выражением:

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}. \quad (2.20)$$

Потери мощности на внутреннем сопротивлении источника

$$P_0 = U_0 I = I^2 R_0. \quad (2.21)$$

Для любой замкнутой цепи должен сохраняться баланс мощностей

$$P_{\text{ист}} = P + P_0. \quad (2.22)$$

Так как электрическая мощность измеряется в ваттах, то единицей измерения электрической энергии является

$$[W] = [Pt] = \text{Вт} \cdot \text{с}.$$

Коэффициент полезного действия электрической цепи  $\eta$  определяется отношением полезной мощности (мощности потребителя) ко всей затраченной мощности (мощности источника)

$$\eta = \frac{P}{P_{\text{ист}}} \cdot 100 \%. \quad (2.23)$$

## 2.8. Закон Джоуля — Ленца

В проводах линии передачи электрической энергии, обмоток якорей и полюсов электрических машин, электробытовых приборов и других потребителей происходит преобразование электрической энергии в тепловую.

Ток  $I$ , протекая по проводнику с сопротивлением  $R$ , нагревает этот проводник. За время  $t$  в этом проводнике выделяется тепло, количество которого определяется количеством электрической энергии, затраченной в этом проводнике, т. е.

$$Q = W = Pt = I^2 Rt, \quad (2.24)$$

где  $Q$  — количество тепла, выделенного в проводнике, Вт·с.

Приведенная зависимость (2.24) является математическим выражением закона Джоуля — Ленца.

Таким образом, закон Джоуля — Ленца устанавливает зависимость между количеством тепла и электрической энергией: количество тепла, выделенное током в проводнике, пропорционально квадрату тока, сопротивлению проводника и времени прохождения тока по проводнику.

Количество тепла  $Q$  измеряется иногда внесистемной единицей — калорией (количество тепла, необходимое для нагревания 1 г воды на 1 °С). Причем 1 кал = 4,187 Дж, следовательно, 1 Вт·с = 1 Дж = 0,24 кал.

Для определения количества тепла  $Q$  в калориях пользуются выражением

$$Q = 0,24 I^2 R t \text{ (кал)}. \quad (2.25)$$

Коэффициент 0,24 называют электротермическим эквивалентом, который устанавливает зависимость между электрической и тепловой энергией.

Например, количество тепла, выделенное в проводнике с сопротивлением  $R = 24$  Ом, по которому проходит ток  $I = 5$  А в течение 2 часов ( $t = 2$  часа =  $2 \cdot 3600 = 7200$  с) составляет:

$$Q = I^2 R t = 5^2 \cdot 24 \cdot 7200 = 4\,320\,000 \text{ Вт} \cdot \text{с} = 4,32 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

или

$$Q = 0,24 \cdot 4,32 \cdot 10^6 = 1,9368 \cdot 10^6 \text{ кал.}$$

Преобразование электрической энергии в тепловую широко используется в разнообразных электронагревательных приборах. Однако преобразование электрической энергии в тепловую вызывает и непроизводительные расходы энергии в электрических машинах, трансформаторах и других элементах электрической цепи и снижает их КПД.

## 2.9. Емкость

**Электрическая емкость** (электроемкость) — физическая величина, характеризующая способность проводника накапливать на себе электрические заряды.

Емкость изолированного проводника (т.е. находящегося вдали от заряженных тел и других проводников) равна:

$$C = \frac{q}{\varphi}$$

где  $\varphi$  — потенциал проводника, прямо пропорциональный заряду  $q$ . Иными словами, емкость проводника — величина, численно равная заряду, который надо сообщить проводнику, чтобы повысить его потенциал на единицу (1 В).

Емкость проводника зависит от его линейных размеров, формы, диэлектрической проницаемости среды, в которую он помещен, и расположения окружающих тел, но не зависит от материала проводника и его агрегатного состояния. Например, если на два проводящих шара (сферы) поместить одинаковый заряд  $q$ , то потенциал шара с меньшим радиусом окажется выше, т.к.

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 R}$$

Следовательно, емкость изолированного шара (сферы), находящегося в однородной диэлектрической среде с проницаемостью  $\epsilon$ , прямо пропорциональна

радиусу шара и определяется формулой:

$$C = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R$$

При заряджении двух проводников между ними появляется электрическое поле и возникает разность потенциалов (напряжение). При переносе заряда с одного проводника на другой совершается работа против сил электрического поля, которая пропорциональна этому заряду.

Таким образом, разность потенциалов (напряжение) после переноса заряда между проводниками пропорциональна заряду этих проводников (на одном проводнике  $+q$ , на другом  $-q$ ).

*Емкостью двух проводников* называют отношение заряда одного из проводников к разности потенциалов между этим проводником и соседним:

$$C = \frac{q}{U}$$

где  $q$  — заряд одного из проводников (на другом проводнике равный по модулю заряд противоположного знака);  $U$  — разность потенциалов между проводниками.

В СИ за единицу емкости принимается 1 фарад (Ф). Эта единица измерения названа в честь английского физика Майкла Фарадея (1791-1867).

Емкость двух проводников равна 1 Ф, если при сообщении им зарядов  $+1$  Кл и  $-1$  Кл между ними возникает разность потенциалов 1 В:  $1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл/В}$ . Емкость выражают также в микрофарадах (мкФ):  $1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$ , и пикофарадах (пФ):  $1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$ . Например, емкость земного шара составляет около 700 мкФ.

Большую емкость имеет конденсатор (от латинского *condenso* — сгущаю).

*Конденсатор* — прибор, состоящий из двух проводников, разделенных слоем диэлектрика, толщина которого мала по сравнению с размерами проводника. Проводники в этом случае называются обкладками конденсатора. Заряды обкладок всегда равны по величине и противоположны по знаку.

По форме проводящих поверхностей различают плоские, цилиндрические и сферические (шаровые) конденсаторы. Проводники должны быть расположены друг относительно друга так, чтобы созданное этими проводниками электрическое поле было сосредоточено между ними. Для зарядки конденсатора его обкладки присоединяют к полюсам источника тока. Можно также одной обкладке сообщить некоторый заряд, а другую обкладку заземлить. Тогда на заземленной обкладке конденсатора останется заряд, противоположный по знаку и равный по модулю заряду, сообщенному первой обкладке. В землю уйдет заряд того знака, которым заряжена первая обкладка. Под зарядом конденсатора понимают абсолютное значение заряда одной из обкладок. Если обкладки заряженного конденсатора соединить проводником, то заряды будут переходить с одной обкладки на другую и нейтрализовать друг друга. Этот процесс называется разрядкой конденсатора. Емкость конденсатора определяется по формуле емкости двух проводников.

Плоский конденсатор представляет собой две плоские металлические пластины, расположенные параллельно на малом расстоянии друг от друга и разделенные слоем диэлектрика.

Заряды пластин конденсатора одинаковы по модулю и противоположны по знаку,

поэтому вне пластин напряженность электрического поля равна нулю, так как равные заряды разного знака создают вне пластин электрические поля, напряженности которых равны по модулю и противоположны по направлению. Поэтому электрическое поле заряженного конденсатора сосредоточено в пространстве между его обкладками и его емкость не зависит от наличия окружающих тел.

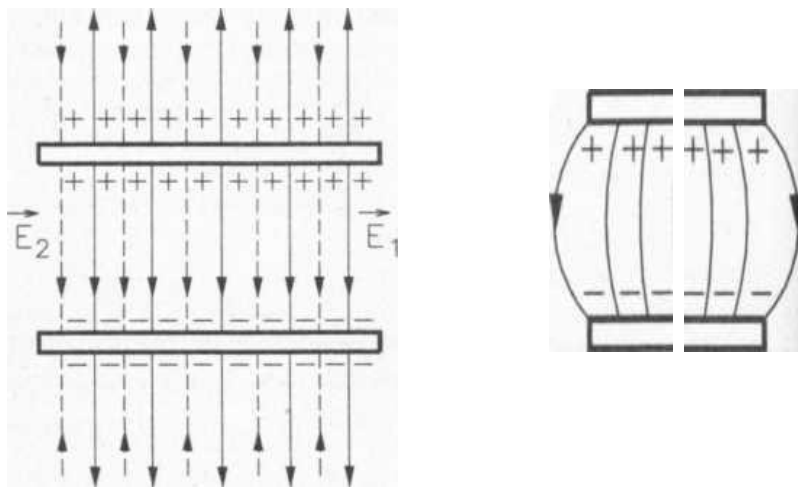


Рис. 2.20

Емкость плоского конденсатора можно вычислить, принимая площадь каждой его пластины за  $S$ , а расстояние между пластинами за  $d$ .

Согласно принципу суперпозиции полей напряженность  $E$  поля между двумя пластинами плоского конденсатора равна сумме напряженностей полей, создаваемых каждой из пластин:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

Напряженности поля положительно ( $\vec{E}_1$ ) и отрицательно ( $\vec{E}_2$ ) заряженных пластин равны по модулю и направлены внутри конденсатора в одну и ту же сторону, поэтому модуль  $E$  результирующей напряженности равен сумме модулей напряженностей поля двух пластин:

$$E = 2E_1$$

Учитывая, что напряженность электрического поля равномерно заряженной плоскости равна:

$$E_1 = k \cdot 2\pi \cdot \sigma = \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0},$$

а поверхностная плотность заряда:  $\sigma = \frac{q}{S}$ , получим:  $E = k \cdot 4\pi\sigma = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0} = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0 S}$ .

В однородном электрическом поле напряженность  $E$  и разность потенциалов (напряжение) связаны между собой соотношением:  $E = \frac{U}{d}$  откуда  $U = E \cdot d$ .

Применяя определение емкости двух проводников, получим формулу для емкости конденсатора (пренебрегая краевым эффектом):

$$C = \frac{q}{U} = \frac{q}{E \cdot d} = \frac{q \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{q \cdot d} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}, \quad C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d},$$

где  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость среды,  $\varepsilon_0$  — электрическая постоянная.

Из этой формулы видно, что емкость конденсатора зависит от площади пластин, расстояния между ними (т.е. от геометрических факторов), а также от электрических свойств среды (диэлектрической проницаемости вещества, заполняющего пространство между пластинами конденсатора). Она не зависит от материала проводников, а также от заряда и разности потенциалов, приложенной к пластинам. При небольших размерах конденсатор может иметь большую емкость.

Если плоский конденсатор состоит из  $n$  пластин (многопластинчатый конденсатор), то его емкость определяют следующим образом:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S(n-1)}{d}$$

Обычно в конденсаторе  $n = 2$ .

Емкость *сферического (шарового) конденсатора* с обкладками в виде двух концентрических сфер радиусами  $R_1$  и  $R_2$  (причем  $R_2 > R_1$ ) вычисляют так:

$$C = \frac{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R_1 R_2}{R_2 - R_1}$$

Емкость цилиндрического конденсатора равна:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 l}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}$$

где  $R_2, R_1$  — радиусы внешнего и внутреннего цилиндров,  $l$  — длина цилиндров.

В зависимости от назначения конденсаторы имеют различное устройство. Металлические электроды технических конденсаторов обычно изготавливаются в виде полосок тонкой фольги, изолированных друг от друга. По типу используемого в качестве изолирующих прокладок диэлектрика конденсаторы бывают бумажными, слюдяными, полистирольными, керамическими, воздушными. Например, бумажный конденсатор состоит из двух полосок металлической фольги (алюминия или станиоля — тонко раскатанного листа олова), изолированных друг от друга и от металлического корпуса бумажными лентами, пропитанными парафином. Полоски и ленты туго сворачивают в рулон и помещают в металлический или фарфоровый корпус (рис. 3.21). Для подключения конденсатора в электрическую цепь от листов фольги делается два вывода через специальные изоляторы. Конденсаторы других типов имеют аналогичное устройство.

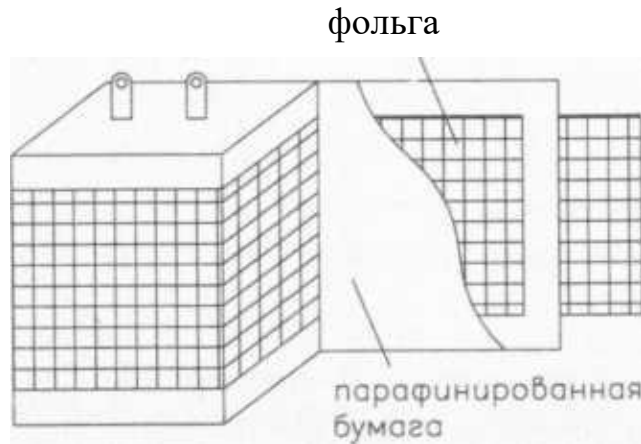


Рис.2.21. Строение бумажного конденсатора

В *электролитических* конденсаторах диэлектриком служит очень тонкая пленка оксидов, покрывающая полосу фольги (одну из обкладок конденсатора). Второй обкладкой служит бумага, пропитанная раствором электролита. В таких конденсаторах за счет уменьшения расстояния между обкладками достигают значительного увеличения емкости.

В радиотехнике широко применяют **конденсаторы переменной емкости**. Такой конденсатор состоит из двух наборов металлических пластин. Диэлектриком является воздух. Его условное обозначение на схемах показано на рисунке. При вращении рукоятки пластины одного набора входят в промежуток между пластинами другого набора. При этом меняется емкость конденсатора пропорционально изменению площади перекрывающейся части пластины.

Конденсаторы получили широкое практическое применение благодаря одному из важных свойств: конденсатор может накапливать энергию более или менее длительное время, а при его разрядке через цепь малого сопротивления он отдает энергию почти мгновенно. Это свойство используется в устройстве лампы-вспышки, применяемой в фотографии.

Возбуждение лазеров (квантовых источников света) осуществляется с помощью газоразрядной трубки, вспышка которой происходит при разрядке батареи конденсаторов большой емкости. Основное применение конденсаторы получили в радиотехнике.

Например, они используются в электрических цепях для получения определенного изменения напряжения за счет изменения заряда, в электрических фильтрах, в колебательном контуре, являющемся основной частью радиоприемника, в автоматических устройствах и т.д.

На практике для получения емкостей нужной величины используют последовательное и параллельное соединение конденсаторов в батарею.

Последовательным называется такое соединение, при котором отрицательно заряженная обкладка предыдущего конденсатора соединена с положительно заряженной обкладкой последующего. На рисунке представлено последовательное соединение трех конденсаторов, емкость которых  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_3$ .



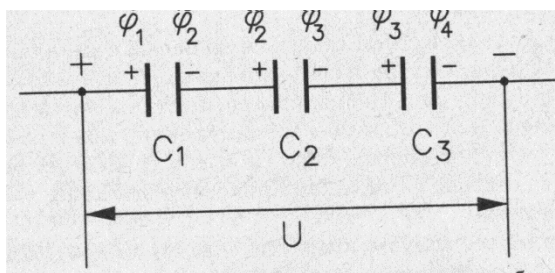


Рисунок 2.22

Отрицательно и положительно заряженные обкладки двух соседних конденсаторов, например первого и второго, составляют один проводник, заряженный вследствие электростатической индукции (влиянием), поэтому они имеют одинаковый потенциал ( $\varphi_2$ ) и отрицательный заряд на обкладке первого конденсатора равен положительному заряду на обкладке второго конденсатора. Таким образом, на всех последовательно соединенных конденсаторах имеется одинаковый заряд  $q$ :  $q = \text{const}$ . Напряжение на батарее (между крайними пластинками всей группы конденсаторов) равно сумме напряжений на отдельных конденсаторах:  $U = U_1 + U_2 + U_3$ .

Действительно, разность потенциалов всей батареи  $U = \varphi_1 - \varphi_4$  складывается из суммы разностей потенциалов между пластинами каждого из конденсаторов:

$$U_1 = \varphi_1 - \varphi_2; U_2 = \varphi_2 - \varphi_3; U_3 = \varphi_3 - \varphi_4;$$

Напряжение на каждом конденсаторе определяется электроемкостью соответствующего конденсатора:

$$C = \frac{q}{U} \Rightarrow U_1 = \frac{q}{C_1}; U_2 = \frac{q}{C_2}; U_3 = \frac{q}{C_3}$$

С учетом этого напряжение на батарее равно:

$$U = \frac{q}{C} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_3} = q \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right)$$

Следовательно, электроемкость батареи последовательно соединенных конденсаторов определяется выражением:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

Из этой формулы видно, что электроемкость батареи последовательно соединенных конденсаторов всегда меньше самой малой из электроемкостей отдельных конденсаторов.

В общем случае:  $\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$ , где  $n$  — число конденсаторов.

Параллельным называется такое соединение, при котором все положительно заряженные обкладки присоединяются к одному проводу, а отрицательно заряженные — к другому. На рисунке показано параллельное соединение конденсаторов электроемкостью  $C_1, C_2$  и  $C_3$ .

При таком соединении все конденсаторы заряжаются до одного и того же напряжения  $U$ :  $U = \text{const}$ .

Заряды на пластинах конденсатора равны:

$$q_1 = C_1 \cdot U; \quad q_2 = C_2 \cdot U; \quad q_3 = C_3 \cdot U;$$

Общий заряд  $q$  всей батареи конденсаторов равен сумме зарядов на отдельных конденсаторах:

$$q = q_1 + q_2 + q_3$$

Емкость батареи конденсаторов:

$$C = \frac{q}{U} = \frac{q_1}{U} + \frac{q_2}{U} + \frac{q_3}{U}$$

Так как  $\frac{q_1}{U} = C_1$ ;  $\frac{q_2}{U} = C_2$ ;  $\frac{q_3}{U} = C_3$ , то  $C = C_1 + C_2 + C_3$

Следовательно, емкость батареи параллельно соединенных конденсаторов равна сумме емкостей отдельных конденсаторов. Иначе говоря, емкость батареи больше самой большой емкости из емкостей отдельных конденсаторов.

В общем случае:  $C = \sum_{i=1}^n C_i$ , где  $n$  — число конденсаторов.

### 2.10. Энергия электрического поля

Для того чтобы зарядить конденсатор, нужно совершить работу по разделению положительных и отрицательных зарядов, равную энергии, приобретаемой конденсатором. Когда конденсатор разряжается, то такую же по величине работу совершают электрические силы поля. Таким образом, заряженный конденсатор обладает потенциальной энергией, равной работе, которая была затрачена на его зарядку.

Вычислим энергию наиболее простого случая плоского конденсатора. Напряженности поля положительно и отрицательно заряженных пластин равны по модулю и одинаково направлены внутри конденсатора. Тогда напряженность поля,

созданного зарядом одной из пластин, равна:  $E_1 = \frac{E}{2}$ , где  $E$  — напряженность поля в конденсаторе.

В однородном поле одной пластины находится заряд  $q$ , распределенный по поверхности другой пластины. Применяя формулу для потенциальной энергии заряда в однородном поле, получим, что энергия конденсатора равна:

$$W_p = q \cdot E_1 \cdot d = q \cdot \frac{E}{2} \cdot d,$$

где  $d$  — расстояние между пластинами,  $q$  — заряд конденсатора.

Напряженность поля в конденсаторе связана с разностью потенциалов между его обкладками соотношением:  $E = \frac{U}{d}$ , откуда  $E \cdot d = U$ .

Следовательно, потенциальная энергия конденсатора равна:  $W_p = \frac{qU}{2}$ .

Эта энергия равна работе, которую совершает электрическое поле при сближении пластин вплотную.

Вспомним, что емкость конденсатора  $C = \frac{q}{U}$ . Тогда можно переписать формулу энергии конденсатора в следующих видах:

$$W_p = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$$

Согласно теории близкодействия вся энергия взаимодействия заряженных тел сосредоточена в электрическом поле этих тел. Поэтому говорят об энергии электрического поля, причем энергия источника поля — заряженных тел — распределена по всему пространству, где имеется электрическое поле.

Энергия поля может быть выражена через его напряженность. Разность потенциалов между обкладками плоского конденсатора  $U = E \cdot d$ , а его емкость  $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$ .

Подставим эти значения в формулу энергии конденсатора. Получим:

$$W_p = \frac{CU^2}{2} = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d} \cdot \frac{E^2 d^2}{2} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} V$$

где  $V$  — объем, занятый полем;  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная;  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость среды.

Таким образом, энергия однородного электрического поля, сосредоточенного в объеме  $V$ , равна:

$$W_p = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} V$$

**Объемной плотностью энергии  $w_p$  электрического поля** называется энергия поля, приходящаяся на единицу объема поля:

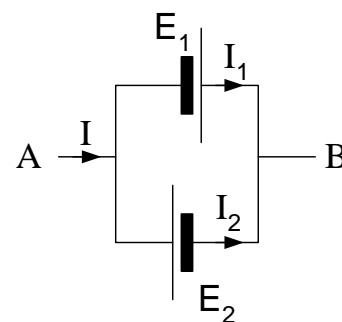
$$w_p = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2}$$

Эта формула справедлива не только для однородного поля плоского конденсатора, но и для произвольных полей, в том числе и изменяющихся во времени. В пространстве, где имеется электрическое поле, сосредоточена энергия.

### *Решите следующие задачи*

2.8. При токе  $I_1 = 1,5$  а напряжение на участке некоторой цепи  $U_1 = 20$  В. При токе  $I_2 = 0,5$  а напряжение на том же участке  $U_2 = 8$  В. Какова ЭДС, действующая на этом участке? Каково будет напряжение  $U_3$ , если ток уменьшить до  $I_3 = 0,1$  А?

2.9. Вычислить ЭДС  $E$  и внутреннее сопротивление  $r$  батареи, показанной на рисунке. Дано  $E_1=E_2=10$  в,  $r_1=1$  Ом,  $r_2=3$  Ом.



2.14. Два элемента соединены по схеме, показанной на рисунке. Определить напряжение на зажимах элементов ( $E_1=1,4$  В,  $E_2=1,1$  В,  $r_1=0,3$  Ом,  $r_2=0,2$  Ом). При каком условии разность потенциалов между точками а и б равна нулю?

