

Законы постоянного тока

Электрический ток — это упорядоченное (направленное) движение электрических зарядов.

В металлах носителями зарядов являются свободные электроны, в электролитах — положительные и отрицательные ионы, в полупроводниках — электроны и дырки, в газах — ионы обоих знаков и электроны.

За направление тока в проводнике принято направление положительных зарядов. Во внешней части цепи, к которой относятся все ее участки, кроме источника тока, ток течет от плюса к минусу, во внутренней части, т. е. внутри источника тока — от минуса к плюсу.

Ниже приведены основные формулы электродинамики.

Формулы силы тока

$$165) I = \frac{q}{t}$$

$$166) I = nevS$$

Здесь I — сила постоянного тока (А), q — заряд, прошедший через поперечное сечение проводника (Кл), t — время прохождения заряда (с), n — концентрация свободных электронов (м^{-3}), e — модуль заряда электрона (Кл), v — скорость упорядоченного движения электронов по проводнику (м/с), S — площадь поперечного сечения проводника (м^2).

Формулы плотности тока

$$167) j = \frac{I}{S}$$

$$168) j = nev$$

Здесь j — плотность тока ($\text{А}/\text{м}^2$), I — сила тока (А), S — площадь поперечного сечения проводника (м^2), n — концентрация свободных электронов в проводнике (м^{-3}), e — модуль заряда электрона (Кл), v — скорость упорядоченного движения свободных электронов (м/с).

Формула сопротивления проводника

$$169) R = \rho \frac{l}{S}$$

Здесь R — сопротивление проводника (Ом), ρ — удельное сопротивление ($\text{Ом} \cdot \text{м}$), l — длина проводника (м), S — площадь поперечного сечения проводника (м^2).

Зависимость сопротивления металлического проводника от температуры

$$170) R = R_0(1 + \alpha t)$$

$$171) R = R_0(1 + \alpha \Delta T)$$

Здесь R — сопротивление проводника при температуре t °С (Ом), R_0 — сопротивление проводника при 0 °С (Ом), α — температурный коэффициент

коэффициент сопротивления (K^{-1}), t — температура по шкале Цельсия, $\Delta T = T - 273$ — изменение абсолютной температуры проводника при нагревании от $0^\circ C = 273 K$ до абсолютной температуры T (К).

Закон Ома для однородного участка цепи

$$172) I = \frac{U}{R}$$

Здесь I — сила тока (А), U — напряжение (В), R — сопротивление участка (Ом).

Закон Ома для неоднородного участка цепи

$$173) I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}}{R}$$

Здесь I — сила тока (А), $\varphi_1 - \varphi_2$ — разность потенциалов на концах участка (В), \mathcal{E} — ЭДС, действующая в участке (В), R — сопротивление участка (Ом).

Формула ЭДС

$$174) \mathcal{E} = \frac{A_{\text{стор. сил}}}{q}$$

Здесь \mathcal{E} — ЭДС (В), $A_{\text{стор. сил}}$ — работа сторонних сил (Дж), q — перемещаемый заряд (Кл).

Закон Ома для всей цепи

$$175) I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

в случае соединенных последовательно одинаковых источников тока

$$176) I = \frac{\mathcal{E}N}{R + rN}$$

в случае соединенных параллельно одинаковых источников тока

$$177) I = \frac{\mathcal{E}}{R + \frac{r}{N}}$$

Здесь I — сила тока в цепи (А), \mathcal{E} — ЭДС источника тока (В), R — сопротивление внешней части цепи (Ом), r — внутреннее сопротивление или сопротивление источника тока (Ом), N — количество одинаковых источников тока (безразмерное).

Сила тока короткого замыкания

при $R = 0$

$$178) I = \frac{\mathcal{E}}{r}$$

Все величины названы в предыдущей формуле.

Расчет сопротивления шунта к амперметру

$$179) R_{\text{ш}} = \frac{R_A}{N - 1}$$

Здесь $R_{\text{ш}}$ — сопротивление шунта (Ом), R_A — сопротивление амперметра (Ом), $N = \frac{I}{I_A}$ — число, показывающее, во сколько раз измеряемая амперметром сила тока I больше силы тока I_A , на которую он рассчитан (безразмерное число).

Расчет добавочного сопротивления к вольтметру

$$180) R_{\text{д.с.}} = R_B (N - 1)$$

Здесь $R_{\text{д.с.}}$ — добавочное сопротивление (Ом), R_B — сопротивление вольтметра (Ом), $N = \frac{U}{U_B}$ — число, показывающее, во сколько раз измеряемое напряжение U больше напряжения U_B , на которое рассчитан вольтметр (безразмерное число).

Последовательное соединение проводников

Сила тока I — одинакова во всех проводниках

$$181) U_{\text{общ}} = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_N$$

$$182) R_{\text{общ}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_N$$

если все проводники имеют одинаковое сопротивление, то

$$183) R_{\text{общ}} = NR$$

$$184) U_{\text{общ}} = NU$$

$$185) \frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2} \text{ — для двух последовательных проводников}$$

Здесь I — сила тока (А), $U_{\text{общ}}$ — общее напряжение на всех последовательно соединенных проводниках (В), $U_1, U_2, U_3, \dots, U_N$ — напряжения на отдельных проводниках (В), $R_{\text{общ}}$ — общее сопротивление всех

последовательно соединенных проводников (Ом), $R_1, R_2, R_3, \dots, R_N$ — сопротивления отдельных проводников (Ом), N — количество одинаковых проводников (безразмерное).

Параллельное соединение проводников

U — одинаково на всех проводниках

$$186) I_{\text{общ}} = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_N$$

$$187) \frac{1}{R_{\text{общ}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_N}$$

если все проводники имеют одинаковое сопротивление, то

$$188) R_{\text{общ}} = \frac{R}{N}$$

$$189) I_{\text{общ}} = NI$$

$$190) R_{\text{общ}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \text{ — общее сопротивление двух параллельных про-}$$

водников

$$191) R_{\text{общ}} = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1} \text{ — общее сопротивление трех парал-}$$

лельных проводников и т. п.

$$192) \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1} \text{ — для двух параллельных проводников}$$

Здесь U — напряжение на проводниках (В), $I_{\text{общ}}$ — сила тока в неразветвленном участке цепи (А), $I_1, I_2, I_3, \dots, I_N$ — сила тока в отдельных проводниках (А), $R_{\text{общ}}$ — общее сопротивление параллельных проводников (Ом), $R_1, R_2, R_3, \dots, R_N$ — сопротивления отдельных проводников (Ом), N — количество одинаковых проводников (безразмерное).

Работа тока

$$193) A = UI t$$

$$194) A = q (\varphi_1 - \varphi_2) = qU$$

$$195) A = I^2 R t$$

$$196) A = \frac{U^2}{R} t$$

$$197) A = \mathcal{E} I t$$

$$198) A = P t$$

Здесь A — работа тока (Дж), U — напряжение на участке цепи (В), I — сила тока в цепи (А), t — время прохождения тока (с), q — прошедший по цепи заряд (Кл), $\varphi_1 - \varphi_2$ — разность потенциалов на концах участка цепи (В), R — сопротивление участка цепи (Ом), \mathcal{E} — ЭДС источника тока (В), P — мощность тока (Вт).

Мощность тока

$$199) P = UI$$

$$200) P = I^2 R$$

$$201) P = \frac{U^2}{R}$$

$$202) P = \mathcal{E} I$$

$$203) P = \frac{A}{t}$$

Здесь P — мощность тока (Вт), U — напряжение (В), I — сила тока (А), R — сопротивление (Ом), \mathcal{E} — ЭДС источника тока (В), A — работа тока (Дж), t — время (с).

Закон Джоуля-Ленца

$$204) Q = I^2 R t$$

$$205) Q = \frac{U^2}{R} t$$

Коэффициент полезного действия (КПД) электрической цепи

$$206) \eta = \frac{U}{\mathcal{E}} \cdot 100\%$$

$$207) \eta = \frac{R}{R+r} \cdot 100\%$$

Здесь η — КПД электрической цепи (% или безразмерный), U — напряжение на внешнем участке цепи (В), R — сопротивление внешнего участка цепи (Ом), r — внутреннее сопротивление или сопротивление источника тока (Ом), \mathcal{E} — ЭДС источника тока (В).

Закон Фарадея для электролиза

$$208) m = kq$$

$$209) m = kIt$$

$$210) m = \frac{1}{F} \frac{M}{n} It$$

Здесь m — масса вещества, выделившегося на электроде (кг), k — электрохимический эквивалент этого вещества (кг/Кл), q — заряд, прошедший через электролит (Кл), I — сила тока в электрохимической ванне (А), t — время электролиза (с), F — число Фарадея (Кл/моль) M — молярная масса выделившегося вещества (кг/моль), n — валентность этого вещества (безразмерная).

Силой тока I называется отношение заряда q , прошедшего через поперечное сечение проводника, ко времени прохождения этого заряда t (формула 165):

$$I = \frac{q}{t}.$$

Сила тока — скалярная величина.

Единица силы тока в СИ — *ампер* (А). Это основная единица СИ.

Плотность тока j — это отношение силы тока к площади поперечного сечения проводника, по которому идет ток (формула 167):

$$j = \frac{I}{S}.$$

Плотность тока — векторная величина. Вектор плотности тока направлен в сторону упорядоченного движения положительных зарядов по проводнику. На рис. 124 стрелками показано направление тока в цепи, совпадающее с направлением вектора плотности тока. Единица плотности тока в СИ — *ампер на квадратный метр* (А/м² или А · м⁻²).

Условие существования электрического тока в проводнике — наличие разности потенциалов на его концах. Если на концах проводника поддерживается постоянная разность потенциалов, то по этому проводнику идет постоянный ток.

Скорость упорядоченного движения свободных электронов по проводнику невелика — она порядка 10⁻³ м/с. Но при подключении проводника к источнику тока ток в нем возникает практически мгновенно по всей

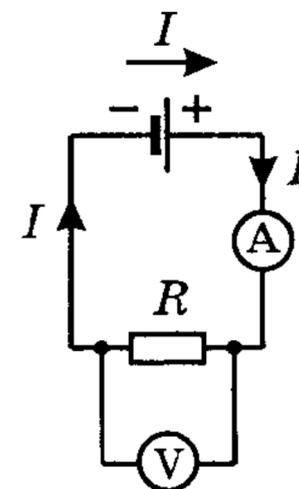


Рис. 124

его длине. Скорость распространения тока по проводнику — это скорость перемещения вдоль него электромагнитной волны, которая огромна и составляет $3 \cdot 10^8$ м/с.

Проводник оказывает *сопротивление электрическому току*. Сопротивление проводника R измеряется отношением напряжения на его концах к силе тока в нем:

$$R = \frac{U}{I}.$$

Сопротивление — скалярная и всегда положительная величина. Сопротивление линейных проводников прямо пропорционально их длине и обратно пропорционально площади поперечного сечения (формула 169):

$$R = \rho \frac{l}{S}.$$

Единица сопротивления в СИ — Ом (ом). Выразим ом через основные единицы СИ:

$$\text{Ом} = \frac{\text{В}}{\text{А}} = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл} \cdot \text{А}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2 \cdot \text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{А}} = \text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-2}.$$

С ростом температуры сопротивление металлических проводников увеличивается, а с понижением — уменьшается. Зависимость сопротивления металлов от температуры отражают формулы 170) и 171):

$$R = R_0(1 + \alpha t)$$

$$R = R_0(1 + \alpha \Delta T)$$

При температурах, близких к абсолютному нулю, сопротивление некоторых металлов падает до нуля. Это явление называется *сверхпроводимостью*. При сверхпроводимости проводник не оказывает сопротивления электрическому току и в нем отсутствуют потери энергии в виде *джоулева тепла*.

Если вам дано расстояние L от источника до потребителя тока, то в формуле 169) $R = \rho \frac{l}{S}$ длина проводника l , соединяющего источник с потребителем, равна этому удвоенному расстоянию: $l = 2L$.

Сопротивление проводника можно изменять с помощью прибора управления током — *реостата*. Реостат включается в цепь последовательно (рис. 125), поэтому при изменении его сопротивления изменяется сила тока в цепи.

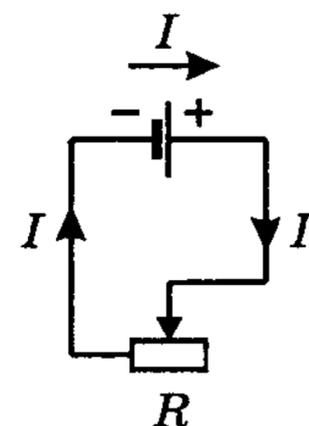


Рис. 125

С помощью этого же прибора управления можно изменять напряжение на участке цепи — в этом случае он называется *потенциометром* или *делителем напряжения*. Потенциометр включается в цепь параллельно тому участку, на котором надо изменить напряжение (рис. 126). При помещении ползунка потенциометра Π в точку 1 напряжение на лампе L равно нулю, а при помещении в точку 2 оно максимально.

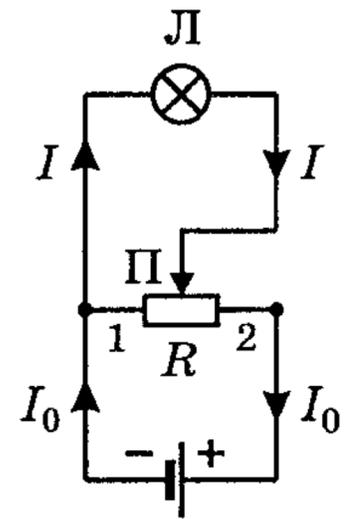


Рис. 126

Основным законом электродинамики является закон Ома.

Закон Ома для проводника (участка цепи): сила тока в проводнике прямо пропорциональна напряжению на его концах и обратно пропорциональна сопротивлению проводника (формула 172):

$$I = \frac{U}{R}.$$

Проводники, для которых выполняется закон Ома, называются *резисторами*. Все металлические проводники — *резисторы*. Вольтамперной характеристикой резистора, т. е. графиком зависимости силы тока в резисторе от приложенного к нему напряжения, является прямая линия (рис. 127). Котангенс ее угла наклона α к оси напряжений численно равен сопротивлению резистора:

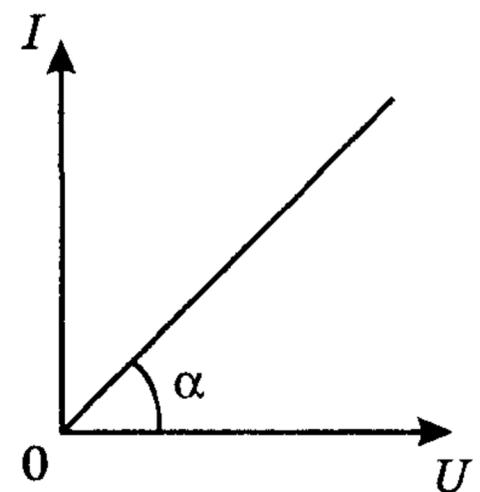


Рис. 127

$$\operatorname{ctg} \alpha = R.$$

В источнике тока действуют сторонние силы — *силы неэлектростатического происхождения* (химические, магнитные и др).

Электродвижущей силой называется величина, измеряемая отношением работы сторонних сил к перемещаемому ими заряду (формула 174):

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{стор. сил}}}{q}.$$

Электродвижущая сила (ЭДС) \mathcal{E} — скалярная алгебраическая величина, т. е. она может быть положительной и отрицательной. Если, обходя контур с источниками тока в произвольно выбранном направлении, мы переходим между его полюсами в сторону повышения потенциала (от минуса к плюсу, т. е. от короткой черточки к длинной), то ЭДС такого источника положительна, а если — в сторону понижения потенциала (от плюса к минусу), то она отрицательна (рис. 128).

ЭДС контура \mathcal{E} , изображенного на рис. 128, равна:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 - \mathcal{E}_4$$

Участок цепи, не содержащий источника тока, т. е. где нет ЭДС, называется *однородным* (рис. 129, а). Разность потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$ на концах однородного участка цепи равна напряжению U на концах этого участка:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Участок цепи, содержащий источник тока, где действует ЭДС, называется *неоднородным* (рис. 129, б). Напряжение U на неоднородном участке цепи равно алгебраической сумме ЭДС \mathcal{E} и разности потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$ на концах этого участка:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}.$$

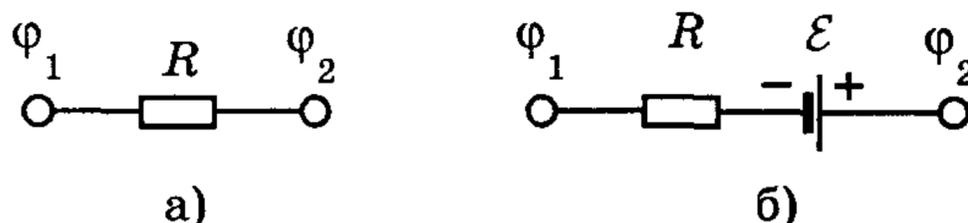


Рис. 129

Единица измерения ЭДС в СИ — *вольт* (В).

ЭДС источника тока равна разности потенциалов на его полюсах при разомкнутой внешней цепи. Поэтому, чтобы измерить ЭДС источника тока, надо разомкнуть цепь и подключить *вольтметр* к его полюсам. Если цепь замкнута, то теперь вольтметр покажет напряжение на всей внешней части цепи. В этом случае ЭДС можно определить как сумму напряжений на внешней и внутренней частях замкнутой цепи.

Закон Ома для замкнутой цепи: сила тока в цепи прямо пропорциональна ЭДС источника тока и обратно пропорциональна сумме сопротивлений внешнего и внутреннего участков цепи (формула 175):

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}.$$

Если N одинаковых источников тока, т.е. источников с одинаковыми ЭДС и внутренними сопротивлениями, соединены последовательно, как на рис. 130, а), то закон Ома для такой цепи представляет формула 176):

$$I = \frac{\mathcal{E}N}{R + rN}.$$

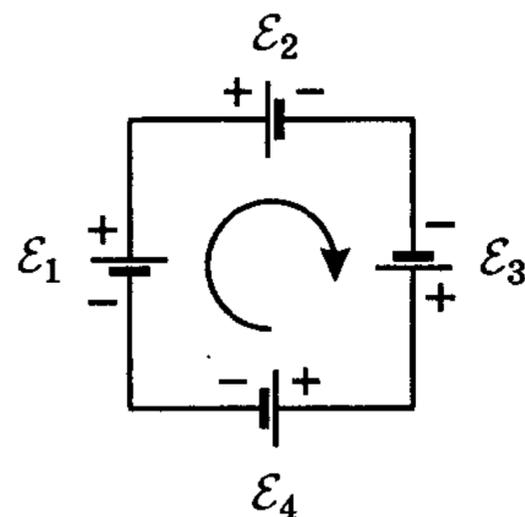


Рис. 128

А если такие источники тока соединены параллельно, как на рис. 130, б), то закон Ома представляет формула 177):

$$I = \frac{\varepsilon}{R + \frac{r}{N}}$$

Амперметр — прибор, измеряющий силу тока. Он включается в цепь последовательно тому участку, в котором ее измеряют.

Если требуется измерить силу тока I , в N раз превышающую максимальную силу тока I_A , на которую рассчитан данный амперметр, то параллельно этому амперметру подключают резистор, который называется *шунт* (рис. 131). Если сопротивление амперметра (оно указано в паспорте прибора R_A), то сопротивление шунта можно рассчитать по формуле 179):

$$R_{ш} = \frac{R_A}{N - 1}$$

Вольтметр — прибор, измеряющий напряжение на участке цепи. Вольтметр подключается параллельно тому участку, на котором измеряется напряжение. Если требуется измерить напряжение U , в N раз превышающее максимальное напряжение U_B , на которое рассчитан данный вольтметр, то для расчета добавочного сопротивления, подключаемого последовательно к вольтметру (рис. 132), применяют формулу 180):

$$R_{д.с.} = R_B (N - 1)$$

Цену деления прибора можно найти, разделив максимальную измеряемую им величину на число делений в шкале прибора.

Проводники можно соединять *последовательно и параллельно*.

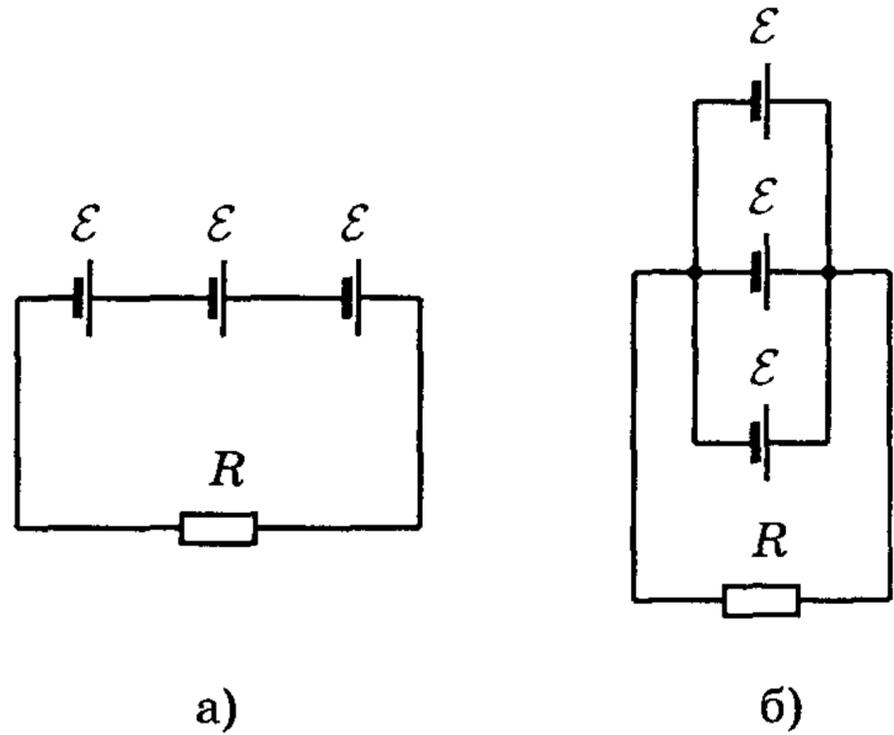


Рис. 130

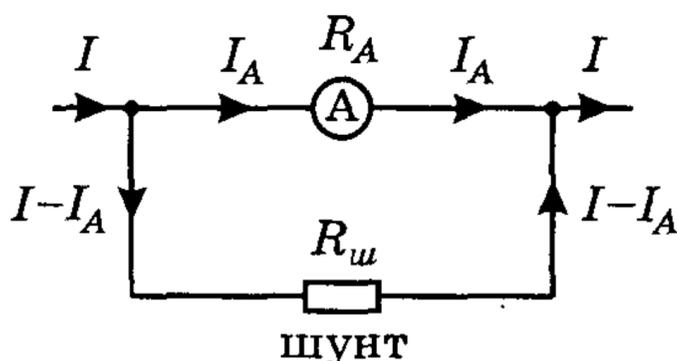


Рис. 131

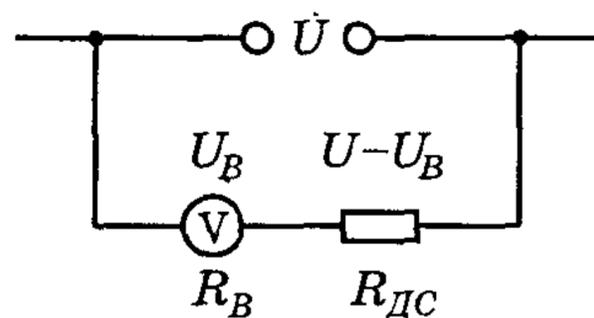


Рис. 132

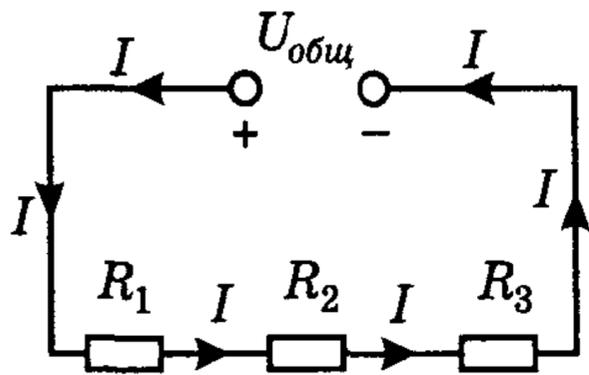


Рис. 133

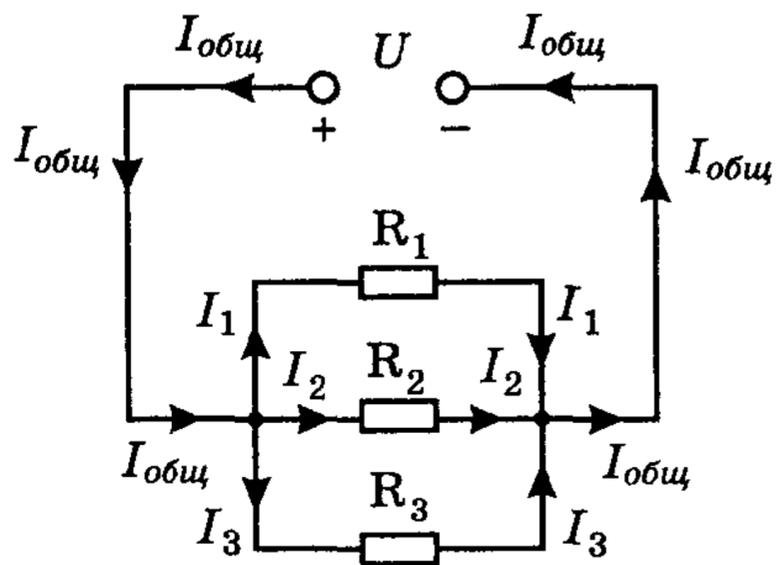


Рис. 134

При *последовательном* соединении проводников (рис. 133):

- а) сила тока во всех проводниках одинакова независимо от сопротивлений проводников, по которым он течет;
- б) общее напряжение равно сумме напряжений на отдельных проводниках (формула 181):

$$U_{\text{общ}} = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_N;$$

- в) общее сопротивление равно сумме сопротивлений отдельных проводников (формула 182):

$$R_{\text{общ}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_N.$$

Если все N проводников, соединенных последовательно, имеют одинаковые сопротивления, то общее напряжение на них и их общее сопротивление определяют формулы (183) и (184): $R_{\text{общ}} = NR$ и $U_{\text{общ}} = NU$.

Напряжения на двух последовательных проводниках прямо пропорциональны их сопротивлениям (формула 185):

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}.$$

При *параллельном* соединении проводников (рис. 134):

- а) напряжения на всех проводниках одинаковы;
- б) сила тока в общем (неразветвленном) участке цепи равна сумме сил токов в отдельных проводниках (формула 186):

$$I_{\text{общ}} = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_N;$$

- в) величина, обратная общему сопротивлению, равна сумме величин, обратных сопротивлениям отдельных проводников (формула 187):

$$\frac{1}{R_{\text{общ}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_N}.$$

Если все N проводников, соединенных параллельно, имеют одинаковое сопротивление, то силу тока в общей части цепи и их общее сопротивление определяют формулы 188) и 189):

$$R_{\text{общ}} = \frac{R}{N} \quad \text{и} \quad I_{\text{общ}} = NI.$$

Общее сопротивление двух параллельных проводников можно вычислить по формуле 190):

$$R_{\text{общ}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2},$$

а трех — по формуле 191):

$$R_{\text{общ}} = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}.$$

Силы токов в двух параллельных проводниках обратно пропорциональны их сопротивлениям (формула 192):

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}.$$

В схеме с последовательными и параллельными проводниками (рис. 135) советуем вывести из плюса источника тока общий ток — его можно обозначить $I_{\text{общ}}$ — и ведите его, не меняя индекса, до первого узла. Узел — это место, где соединено более двух проводников. Далее этот ток разветвляется по параллельным проводникам и индекс его меняется. Советуем теперь индекс силы тока в параллельной ветви ставить таким же, как и индекс сопротивления, по которому течет этот ток. В последнем узле токи, текущие по параллельным ветвям, стекаются в общий ток, который течет и через источник тока. Силы токов в параллельных проводниках одинаковы только тогда, когда одинаковы сопротивления этих проводников. Сумма сил токов, входящих в узел, равна сумме сил токов, выходящих из узла.

В формулах закона Ома 175)–177) сопротивление R — это всегда общее сопротивление всей внешней части цепи, а сила тока I — это сила тока только в неразветвленном участке цепи, но не в отдельных параллельных ветвях.

Напряжение на параллельных ветвях можно найти, умножив

- а) силу общего тока на общее сопротивление всего параллельного участка;
- б) умножив силу тока в любой параллельной ветви на ее сопротивление;

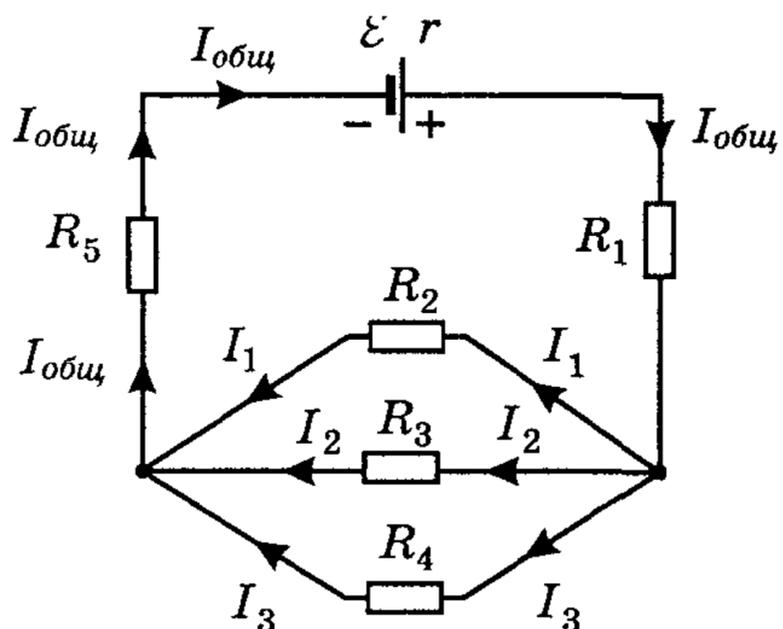


Рис. 135

в) отняв от ЭДС источника напряжения на всех остальных участках, включая и напряжение на внутреннем участке цепи.

Ниже приведены некоторые формулы, которые могут пригодиться при расчете электрической цепи, подобной той, что на рис. 135:

$$I_{\text{общ}} = \frac{\varepsilon}{R_{\text{общ}} + r}, \quad R_{\text{общ}} = R_1 + \frac{R_2 R_3 R_4}{R_2 R_3 + R_3 R_4 + R_4 R_1} + R_5,$$

$$U_1 = I_{\text{общ}} R_1, \quad U_{234} = I_{\text{общ}} R_{234}, \quad U_{234} = I_2 R_2 = I_3 R_3 = I_4 R_4,$$

$$R_{234} = \frac{R_2 R_3 R_4}{R_2 R_3 + R_3 R_4 + R_4 R_2}, \quad U_5 = I_{\text{общ}} R_5, \quad U_{\text{внеш}} = I_{\text{общ}} R_{\text{общ}},$$

$$U_{\text{внутр}} = I_{\text{общ}} r, \quad U_{234} = \varepsilon - U_1 - U_5 - U_{\text{внутр}},$$

$$\eta = \frac{U_{\text{внеш}}}{\varepsilon} \cdot 100\%, \quad \eta = \frac{R_{\text{общ}}}{R_{\text{общ}} + r} \cdot 100\%.$$

Если вам попадется схема, подобная той, что на рис. 136, а), обратите внимание, есть ли симметрия между сопротивлениями слева и справа от перемычки ab , а также между верхними и нижними сопротивлениями. Если есть, то точки a и b имеют одинаковый потенциал φ и, значит, разность потенциалов между ними равна нулю. Поэтому ток по перемычке сопротивлением R идти не будет и ее, можно из схемы исключить (рис. 136, б), значительно упростив расчет:

$$R_{\text{общ}} = \frac{R_1 + R_2}{2}.$$

Запомните: все концы проводников с одинаковыми потенциалами можно соединить в один узел или, наоборот, развести, получив более простую схему, общее сопротивление которой останется прежним.

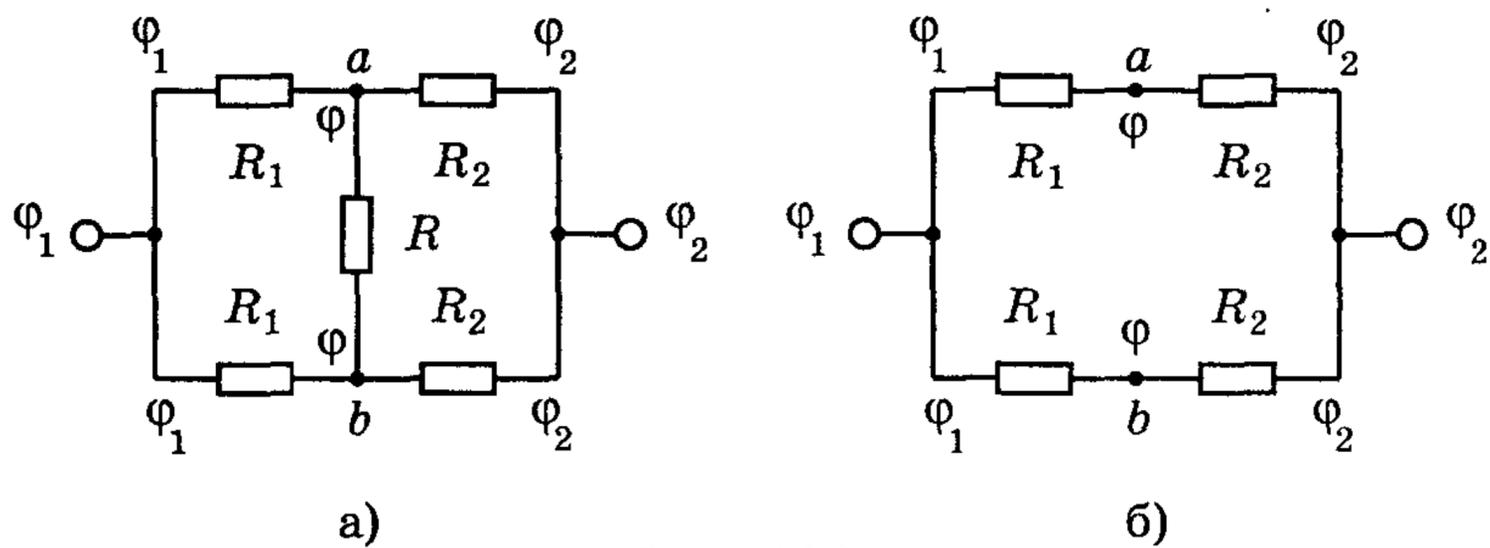


Рис. 136

Если в некоторый участок цепи включен конденсатор, то постоянный ток по этому участку идти не будет, но на обкладках конденсатора возникнет разность потенциалов (напряжение), равная разности потенциалов (напряжению) на концах этого участка.

Если проводник представляет собой сплав разных металлов, равномерно распределенных по его объему, то его можно представить как параллельное соединение проводников из каждого металла в отдельности. При этом длина каждого из таких проводников равна длине проводника из сплава, а площадь поперечного сечения проводника из сплава равна сумме площадей поперечных сечений проводников из отдельных металлов, входящих в сплав. Например, если проводник из сплава меди и стали имеет длину l и площадь поперечного сечения S , то его сопротивление R можно определить через сопротивления медного и стального участков следующим образом:

$$R = \frac{R_{\text{меди}} R_{\text{стали}}}{R_{\text{меди}} + R_{\text{стали}}},$$

где, согласно формуле 169),

$$R_{\text{меди}} = \rho_{\text{меди}} \frac{l}{S_{\text{меди}}} \text{ и } R_{\text{стали}} = \rho_{\text{стали}} \frac{l}{S_{\text{стали}}},$$

и кроме того, $S = S_{\text{меди}} + S_{\text{стали}}$.

При подключении аккумулятора для зарядки к генератору постоянного тока соединяют их одноименные полюса. При этом напряжение на полюсах генератора U равно сумме ЭДС аккумулятора \mathcal{E} и падения напряжения $U_{\text{внутр}}$ на внутреннем сопротивлении аккумулятора r :

$$U = \mathcal{E} + U_{\text{внутр}} = \mathcal{E} + Ir.$$

Здесь I — сила зарядного тока.

Когда по проводнику идет ток, он обладает мощностью P , которую определяют формулы 199)–203):

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} \text{ и т. п.}$$

Ток может совершить работу A , которую определяют формулы (193)–(198):

$$A = UIt = I^2 Rt = \frac{U^2}{R} t \text{ и т. п.}$$

Следует знать, что мощность тока во внешней части цепи *максимальна*, когда сопротивление внешней части цепи R равно внутреннему сопротивлению r , т. е. сопротивлению источника тока.

При прохождении тока по металлическому проводнику в нем выделяется некоторое количество теплоты вследствие усиления колебаний ионов в узлах кристаллической решетки металла. Это количество теплоты Q определяет закон Джоуля-Ленца.

Закон Джоуля-Ленца: количество теплоты, выделившееся в проводнике при прохождении по нему электрического тока, прямо пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению проводника и времени его прохождения (формула 204):

$$Q = I^2 Rt.$$

Для подсчета количества выделившейся теплоты можно применить также формулу (205), которой удобно пользоваться, когда неизменно напряжение на данном участке цепи, например, если нагревательные приборы включают в одну и ту же розетку:

$$Q = \frac{U^2}{R} t.$$

В формуле КПД электрической цепи (206)

$$\eta = \frac{U}{\mathcal{E}} \cdot 100\%$$

U — это напряжение на всей внешней части цепи, т. е. на полюсах источника тока, когда цепь замкнута. А в формуле КПД (207)

$$\eta = \frac{R}{R+r} \cdot 100\%$$

R — это сопротивление всей внешней части цепи. Следует знать, что *при коротком замыкании (формула 178)*

$$I = \frac{\mathcal{E}}{r},$$

когда сопротивление внешней части цепи R равно нулю, *КПД электрической цепи тоже равен нулю.*

Металлы относят к *проводникам первого рода*. В них при прохождении тока не происходит переноса вещества. К таким же проводникам относятся *полупроводники*. К *проводникам второго рода*, в которых при прохождении тока переносится вещество, относят *электролиты и газы*.

Полупроводники — это вещества, у которых удельное сопротивление больше, чем у металлов, но меньше, чем у диэлектриков.

При низких температурах химически чистый полупроводник является диэлектриком, — он не проводит электрический ток. При высоких температурах за счет энергии нагревателя в полупроводнике возникают свободные носители зарядов — *электроны* и *дырки*, которые могут перемещаться по полупроводнику под действием электрического поля. При этом дырки ведут себя как положительные заряды. Проводимость химически чистых полупроводников называется *электронно-дырочной проводимостью*.

С повышением температуры сопротивление полупроводника уменьшается из-за увеличения числа электронов и дырок. В этом состоит основное отличие полупроводников от металлов, у которых при нагревании сопротивление увеличивается.

Примесной проводимостью называют проводимость полупроводника с примесью, имеющей иную валентность, чем основной полупроводник. Если валентность примеси больше валентности основного полупроводника, то примесь называется *донором*, а проводимость — *донорной* или проводимостью *n-типа*. При донорной проводимости носителями зарядов являются свободные электроны.

Если валентность примеси меньше валентности основного полупроводника, то примесь называется *акцептором*, а проводимость — *акцепторной* или проводимостью *p-типа*. При акцепторной проводимости носителями зарядов являются дырки.

Место спая двух полупроводников с разными типами проводимости называется *p-n-переходом*. *Основное свойство p-n-перехода* — *повышенное сопротивление* по сравнению с остальными частями полупроводников.

Если через *p-n-переход* текут основные носители зарядов, то ток называется *прямым*, а если через *p-n-переход* текут неосновные носители зарядов, то ток называется *обратным*, и он значительно меньше прямого тока. Свойство полупроводника с *p-n-переходом* пропускать прямой ток большой силы и значительно уменьшать силу обратного тока используется для выпрямления переменного тока.

Электролитами называют водные растворы солей, кислот и оснований, а также их расплавы. При помещении соли, кислоты или основания в воду в 81 раз ослабевают силы притяжения друг к другу ионов

противоположных знаков в молекулах этих веществ (диэлектрическая проницаемость воды $\epsilon = 81$), и они распадаются на ионы. Этот процесс называется *диссоциацией*. Если в электролит поместить электроды и подключить их к полюсам источника тока, то по электролиту пойдет электрический ток.

Ток в электролитах — это упорядоченное движение положительных и отрицательных ионов электролита к электродам в электрическом поле между *катодом* и *анодом*. *Катодом* называется электрод, соединенный с минусом источника тока, а *анодом* — электрод, соединенный с плюсом. При этом положительные ионы электролита устремляются к катоду, а отрицательные — к аноду.

Электролиз — это явление выделения вещества на электродах при прохождении через электролит электрического тока.

Массу выделившегося на электроде вещества определяет *закон Фарадея для электролиза* (формула 208): *масса вещества, выделившегося на электроде при электролизе, прямо пропорциональна заряду, прошедшему через электролит* или несколько иная формулировка этого закона: *масса вещества, выделившегося на электроде при электролизе, прямо пропорциональна силе тока и времени его прохождения* (формулы 209 и 210):

$$m = kq = kIt.$$

При *электролизе* вещество выделяется и на катоде, и на аноде. Но при одинаковой силе тока и времени его прохождения на катоде и аноде выделяются разные вещества, у которых разный электрохимический эквивалент, поэтому и масса выделившихся на катоде и аноде веществ различна.

На рис. 137 изображена вольтамперная характеристика процесса прохождения тока через электролит, т. е. зависимость силы тока в электрохимической ванне от напряжения, приложенного к электродам.

Участок графика 0 — 1 соответствует прямо пропорциональной зависимости силы тока в электролите от напряжения на электродах, т. е. здесь выполняется закон Ома для участка цепи. Однако при достаточно большом напряжении, называемом *напряжением насыщения*, все ионы электролита достигают электродов. При дальнейшем увеличении напряжения растет их скорость, но количество ионов, достигающих электродов, будет оставаться прежним, поэтому

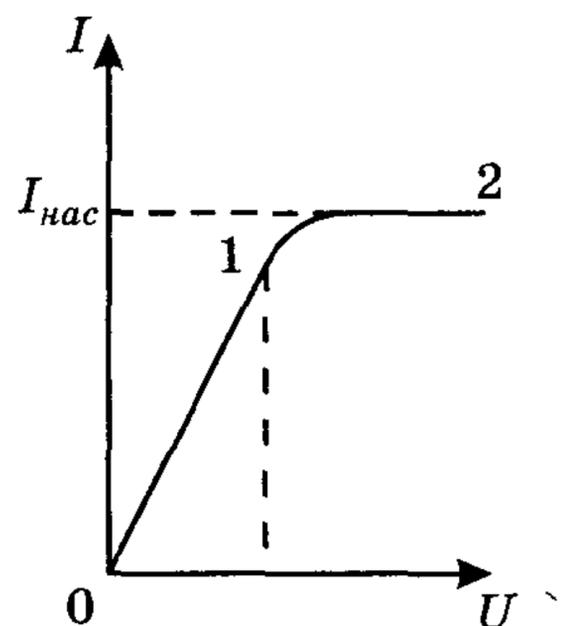


Рис 137

и сила тока расти не будет (участок графика 1–2). Такой ток называется *током насыщения*.

Если в задаче на электролиз что либо сказано о толщине h отлагаемого на электроде вещества, то его массу m можно выразить через плотность ρ и объем V , а объем — через толщину и площадь покрытия S :

$$m = \rho V \quad \text{и} \quad V = hS.$$

Иногда в подобных задачах встречается термин «выход по току». Выходом по току называют отношение массы фактически выделившегося вещества к массе вещества, которое должно было выделиться в соответствии с законом Фарадея для электролиза (т. е. по формулам 208–210), так как обычно выделяется меньше вещества, чем должно было выделиться в соответствии с этими формулами из-за различных потерь в электрохимической ванне.

Следует знать, что заряд q в формуле 208) $m = kq$ равен сумме зарядов всех положительных и всех отрицательных ионов, дошедших до электродов. А так как число N положительных ионов в электролите равно числу отрицательных ионов, то заряд q можно представить как удвоенное произведение числа всех положительных или отрицательных ионов на заряд одного иона q_i :

$$q = Nq_i.$$

Иногда в задачах на электролиз встречается понятие «средняя скорость роста толщины покрытия электрода». Так называют отношение толщины покрытия электрода выделившимся на нем веществом ко времени электролиза.

Электролиз применяется при получении из руды химически чистых металлов, при нанесении металлических покрытий и в других областях промышленности.

Газ при нормальных условиях не проводит электрический ток. Чтобы газ стал проводником тока, его надо *ионизировать* — разбить нейтральные молекулы и атомы газа на заряженные частицы. *Ионизаторами* могут быть пламя газовой горелки, пучки быстрых электронов, гамма-лучи и др. Если в ионизированный газ поместить электроды и подключить их к полюсам источника тока, то по газу пойдет электрический ток. Это явление называют *газовым разрядом*.

Ток в газе — это упорядоченное движение электронов и ионов обоих знаков под действием электрического поля между электродами, внесенными в ионизированный газ.

На рис. 138 изображена вольтамперная характеристика газового разряда, т. е. зависимость силы тока в газе от напряжения на электродах.

В отсутствие напряжения ионы и электроны ионизированного газа участвуют в тепловом хаотическом движении. При росте напряжения от нуля до состояния насыщения (участок 0–1 графика) все большее число заряженных частиц достигает электродов, сила тока возрастает прямо пропорционально напряжению, — поэтому на участке 0–1 выполняется закон Ома для участка цепи. После достижения состояния насыщения, когда все заряженные частицы достигают электродов, сила тока остается постоянной при увеличении напряжения (участок 1–2). Но при достижении некоторого, достаточно большого напряжения U_1 электроны начинают бомбардировать нейтральные атомы газа, выбивая из них новые электроны, и при этом возникают новые ионы, поэтому сила тока снова начинает расти (участок 2–3). Весь процесс на участке 0–3 происходит под воздействием ионизатора. Если его выключить, ток прекратится, поэтому такой газовый разряд называется *несамостоятельным разрядом*.

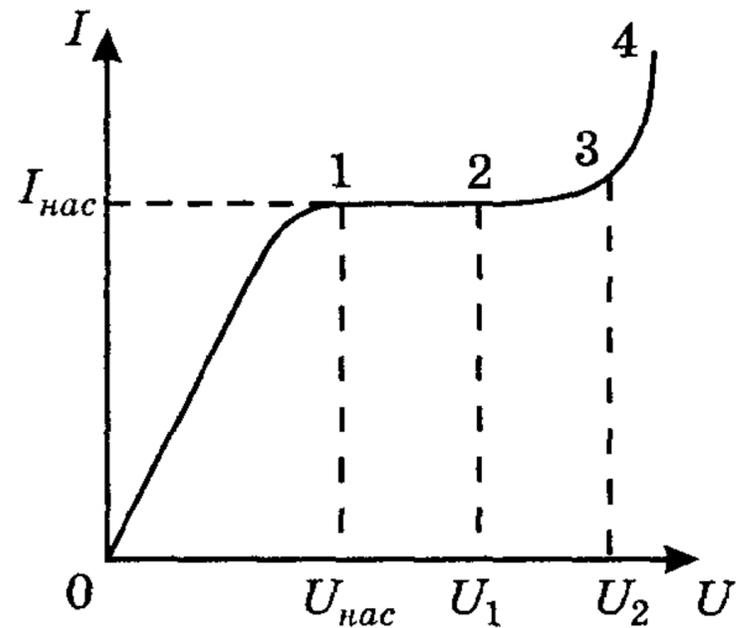


Рис. 138

При возрастании напряжения до U_2 тяжелые положительные ионы разгоняются до таких скоростей, что начинают бомбардировать катод, выбивая из него новые электроны, из-за чего число заряженных частиц резко возрастает и сила тока быстро растет (участок 3–4). Если теперь убрать ионизатор, то разряд не прекратится, поэтому он называется *самостоятельным разрядом*.

Несамостоятельный разряд используется в газовых лазерах, а самостоятельный — в лампах дневного света, при сварке металлов, в искровых измерительных приборах и других технических устройствах.

В технике под высоким вакуумом понимают такое состояние газа в сосуде, когда оставшиеся в нем атом или молекула могут пролететь от одной стенки сосуда до противоположной, не испытав ни одного соударения со встречными атомами или молекулами. Такой вакуум создается в вакуумных приборах, например, в вакуумных диодах, триодах, электронно-лучевых трубках и т. п.

Источником зарядов в таких устройствах служит нагретый электрод, испускающий *термоэлектроны*.

Испускание нагретым металлом свободных электронов называется *термоэлектронной эмиссией*.

Если при этом на накаленный электрод подать минус, т. е. сделать его катодом, а на расположенный напротив электрод подать плюс, т. е. сделать его анодом, то в вакууме пойдет ток.

Ток в вакууме — это упорядоченное движение любых заряженных частиц под действием электрического поля между катодом и анодом. Как правило, такими частицами являются электроны. Электронная лампа с накаленным катодом и расположенным напротив анодом называется *двухэлектродной электронной лампой* или *вакуумным диодом*. Ее схематическое изображение показано на рис. 139.

Если на катод диода подать плюс, а на анод — минус, то анод станет отталкивать термоэлектроны, а катод их притягивать обратно, поэтому ток прекратится. Свойство диода пропускать ток, только когда потенциал анода выше потенциала катода, и не пропускать, когда наоборот, используется для выпрямления переменного тока.

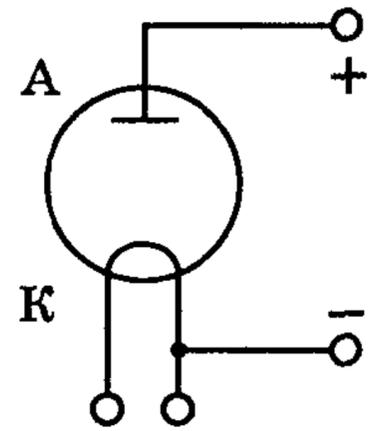


Рис. 139

A11. Сколько электронов проходит через поперечное сечение проводника за 8 мкс при силе тока 2 мА?

- 1) $2 \cdot 10^{10}$ 2) $1 \cdot 10^{11}$ 3) $1,6 \cdot 10^{12}$ 4) $3,2 \cdot 10^9$

A12. При увеличении вдвое напряжения на проводнике и уменьшении вдвое его длины сила тока в нем

- 1) уменьшится вдвое 2) не изменится
3) увеличится в 4 раза 4) увеличится вдвое

A13. Сопротивление амперметра 6 мОм, максимальная сила тока, на которую он рассчитан, 10 А. Чтобы можно было этим амперметром измерять токи силой до 50 А, к нему надо подключить шунт сопротивлением

- 1) 1,5 мОм 2) 3 мОм 3) 6,5 мОм 4) 24 мОм

A14. Сопротивление вольтметра 10 Ом, максимальное напряжение, на которое он рассчитан, 10 В. Чтобы измерить этим вольтметром напряжения до 200 В, к нему надо подключить добавочное сопротивление

- 1) 50 Ом 2) 240 Ом 3) 190 Ом 4) 2000 Ом

A15. Напряжение на зажимах источника 100 В, каждое из сопротивлений на рис. 161 равно 5 Ом. Сила тока в неразветвленном участке цепи равна

- 1) 5 А 2) 10 А
3) 20 А 4) 4 А

A16. На рис. 162 изображен график зависимости силы тока от напряжения на резисторе. Угол наклона графика к оси напряжений равен 60° . Сопротивление резистора примерно равно

- 1) 0,57 Ом 2) 1,7 Ом
3) 1 Ом 4) 1,4 Ом

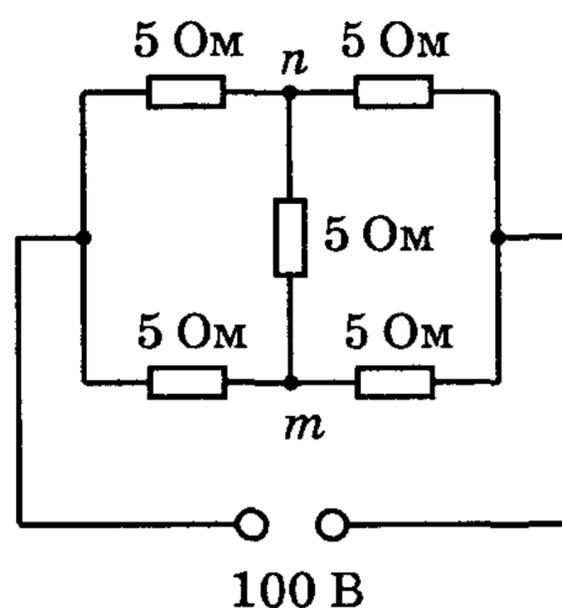


Рис. 161

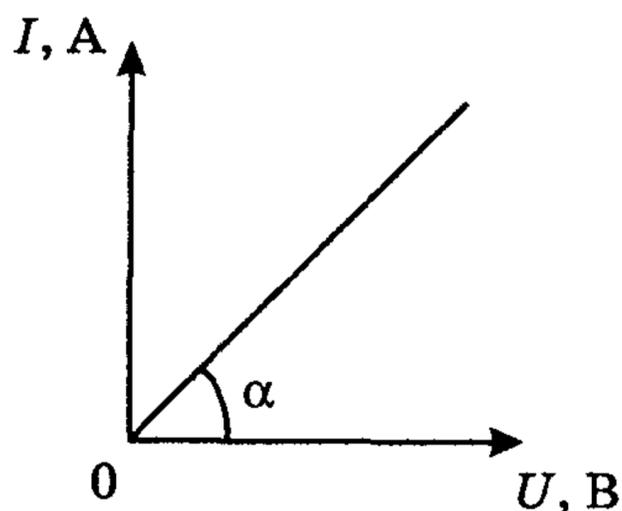


Рис. 162

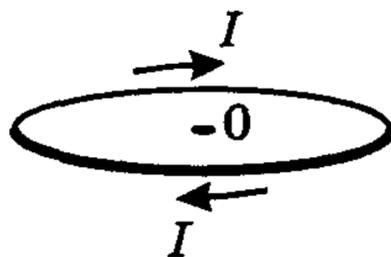


Рис. 163

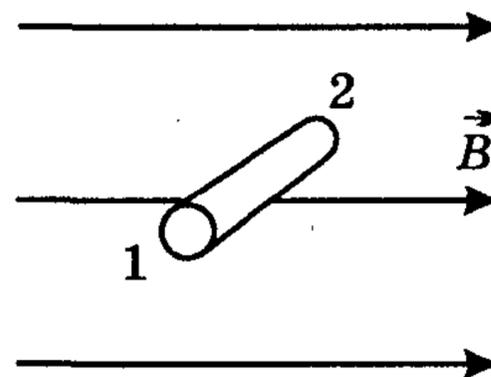


Рис. 164

A17. Длину спирали электроплитки укоротили вдвое. При включении электроплитки в ту же розетку, мощность тока в электроплитке

- | | |
|----------------------|-------------------------|
| 1) уменьшилась вдвое | 2) увеличилась в 4 раза |
| 3) не изменилась | 4) увеличилась вдвое |

A18. Если валентность примеси меньше валентности основного полупроводника, то носителями зарядов в нем будут

- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| 1) положительные ионы | 2) дырки |
| 3) электроны | 4) отрицательные ионы |

A19. На катоде за 1 мин выделилось 0,99 г меди. Электрохимический эквивалент меди равен 0,33 мг/Кл. Чему равна сила тока при электролизе?

- | | | | |
|---------|---------|---------|---------|
| 1) 20 А | 2) 10 А | 3) 50 А | 4) 30 А |
|---------|---------|---------|---------|

A20. При газовом разряде носителями зарядов являются

- | | |
|----------------------|----------------------------------|
| 1) только электроны | 2) только положительные ионы |
| 3) ионы обоих знаков | 4) ионы обоих знаков и электроны |

A11. Согласно формулам 165) и 131)

$$I = \frac{q}{t} = \frac{Ne}{t}, \text{ откуда } N = \frac{It}{e}.$$

$$N = \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 8 \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 10^{11}.$$

Правильный ответ 2).

A12. Согласно формулам 172) и 169)

$$I = \frac{U}{R} = \frac{US}{\rho l}.$$

Если напряжение увеличить вдвое и уменьшить вдвое длину, то сила тока увеличится в 4 раза.

Правильный ответ 3).

A13. Согласно формуле 179) сопротивление шунта равно:

$$R_{\text{ш}} = \frac{R_A}{N-1}, \text{ где в нашем случае } N = \frac{I}{I_A} = \frac{50 \text{ А}}{10 \text{ А}} = 5.$$

С учетом этого $R_{\text{ш}} = \frac{6}{5-1} \text{ мОм} = 1,5 \text{ мОм}.$

Правильный ответ 1).

A14. Согласно формуле 180)

$$R_{\text{д.с.}} = R_B (N-1), \text{ где } N = \frac{U}{U_B} = \frac{200 \text{ В}}{10 \text{ В}} = 20.$$

С учетом этого $R_{\text{д.с.}} = 10 (20 - 1) \text{ Ом} = 190 \text{ Ом}.$

Правильный ответ 3).

A15. Так как в силу симметрии схемы потенциалы точек m и n одинаковы, то разность потенциалов на концах перемычки mn , равная напряжению на ней, равна нулю, поэтому ток через перемычку не пойдет, и ее можно из схемы убрать. Тогда мы получим эквивалентную схему, изображенную на рис. 170. Силу тока I , текущего по неразветвленной части цепи, можно найти по закону Ома для участка цепи (формула 172). Для этого нужно разделить напряжение $U = 100 \text{ В}$ на общее сопротивление всех четырех резисторов. Два одинаковых верхних резистора соединены последовательно, поэтому, согласно формуле 183), их общее сопротивление равно $2 \cdot 5 \text{ Ом} = 10 \text{ Ом}$. Общее сопротивление двух нижних таких же

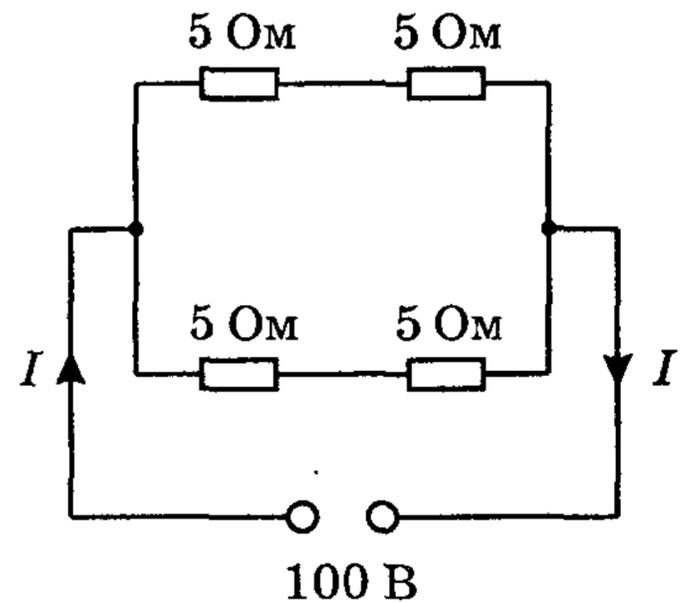


Рис. 170

последовательных резисторов тоже равно 10 Ом. А так как обе параллельные ветви с двумя последовательными резисторами имеют одинаковое сопротивление, то, согласно формуле 188, их общее сопротивление равно $\frac{10}{2}$ Ом = 5 Ом. Поэтому сила тока в неразветвленном участке цепи равна

$$I = \frac{100 \text{ В}}{5 \text{ Ом}} = 20 \text{ А.}$$

Правильный ответ 3).

А16. Спроецируем любую точку M графика на ось напряжений. Получим прямоугольный треугольник OMP (рис. 171). В этом треугольнике сторона OP численно равна напряжению U , а сторона MP — силе тока I . Котангенс угла наклона графика к оси напряжений равен отношению прилежащего катета OP к противолежащему катету MP :

$$\text{ctg } \alpha \frac{OP}{MP} = \frac{U}{I} = R, \text{ согласно формуле 172).}$$

$$\text{Следовательно, } R = \text{ctg } 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{3} = 0,57 \text{ Ом.}$$

Правильный ответ 1).

А17. Поскольку спираль электроплитки включали в ту же розетку, напряжение на ней оставалось прежним. Поэтому мы воспользуемся формулами 201) и 169), согласно которым мощность тока в электроплитке P и ее сопротивление R соответственно равны:

$$P = \frac{U^2}{R} \text{ и } R = \rho \frac{l}{S}, \text{ поэтому } P = \frac{U^2 S}{\rho l}.$$

Следовательно, если длину спирали l , стоящую в знаменателе дроби, уменьшили вдвое, то мощность тока P вдвое увеличится.

Правильный ответ 4).

А18. Если валентность примеси меньше валентности основного полупроводника, то носителями зарядов будут дырки.

Правильный ответ 2).

А19. Согласно формуле 209) $m = kIt$, откуда

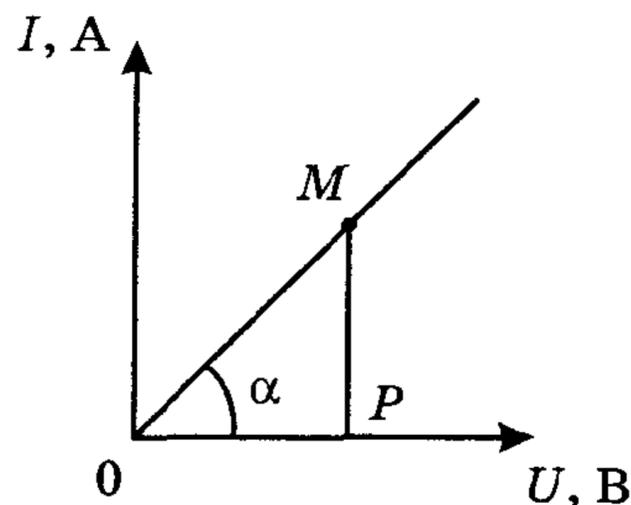


Рис. 171

$$I = \frac{m}{kt} = \frac{0,99 \cdot 10^{-3}}{0,33 \cdot 10^{-6} \cdot 60} \text{ A} = 50 \text{ A}.$$

Правильный ответ 3).

A20. Носителями зарядов в газовом разряде являются ионы обоих знаков и электроны.

Правильный ответ 4).

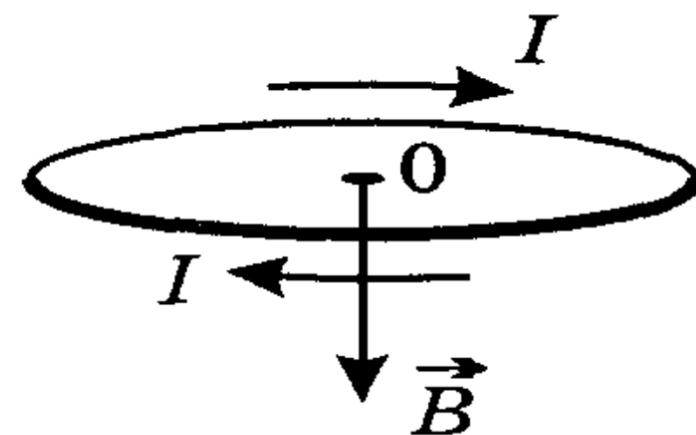


Рис. 172