

Н. П. АРХАНГЕЛЬСКИЙ, С. Л. МАДОРСКИЙ, А. М. ШАПИРО

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
И
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ
ШЛЮЗОВ

ИЗДАТЕЛЬСТВО • РЕЧНОЙ ТРАНСПОРТ • МОСКВА • 1961

Н. П. АРХАНГЕЛЬСКИЙ,
С. Л. МАДОРСКИЙ,
А. М. ШАПИРО

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ШЛЮЗОВ

*Допущено Учебно-методическим советом при
Управлении кадров и учебных заведений МРФ
в качестве учебного пособия для речных училищ
и техникумов*

ИЗДАТЕЛЬСТВО «РЕЧНОЙ ТРАНСПОРТ»

МОСКВА — 1961

В книге дается краткое изложение основ электротехники, описание основного электрооборудования и схем управления механизмами электрифицированных судоходных шлюзов.

Книга предназначена в качестве учебного пособия для учащихся речных училищ и техникумов и написана в соответствии с программой курса «Электротехника и электрическое оборудование шлюзов» для специальности «Водные пути сообщения».

Книга также может служить пособием по изучению электрооборудования для эксплуатационного персонала шлюзов.

Редактор *ВЫГОВСКИЙ В. И.*

Рецензент *ЖДАНОВ В. С.*

Переплет художника *КОМИССАРОВА И. П.*

ПРЕДИСЛОВИЕ

Книга предназначена в качестве учебного пособия для учащихся речных училищ и техникумов и написана в соответствии с программой курса «Электротехника и электрическое оборудование шлюзов» для специальности «Водные пути сообщения» этих учебных заведений.

В книге дается изложение основ электротехники, достаточное для понимания устройства и принципа действия современного электропривода, и описание основного электрооборудования и схем управления механизмами электрифицированных судоводных шлюзов.

Книга может служить пособием по изучению электрооборудования для эксплуатационного персонала шлюзов.

Раздел первый написан преподавателем Н. П. Архангельским, второй и третий — преподавателем А. М. Шапиро, четвертый — инж. С. Л. Мадорским. В обработке первого раздела принимал участие аспирант Н. Н. Соловьев.

Авторы выражают большую благодарность инж. В. И. Выговскому за ценные указания и тщательное редактирование рукописи.

В связи с тем, что настоящее пособие для речных училищ и техникумов по этой специальности издается впервые, авторы будут очень благодарны за все пожелания и замечания читателей, которые просим направлять по адресу: Москва, К-12, Хрустальный пер., дом 1/3, пом. 84, издательство «Речной транспорт».

Авторы

ВВЕДЕНИЕ

Расцвет мировой науки и техники за последнее столетие целиком связан с открытием и использованием электрической энергии. Электрическую энергию можно получить практически из любых видов энергии: тепловой, химической, механической, лучистой и т. п. Ее можно передавать по проводам на значительные расстояния, разделять на малые ручки и объединять в мощные потоки. А главное, электрическая энергия легко преобразуется в любые другие виды энергии, что создает широкие возможности для ее использования. От небольшой настольной лампочки до гигантского ускорителя элементарных частиц — синхрофазотрона на 10 млрд. электронов-вольт — таков размах распространения электрической энергии в промышленность, транспорт, сельское хозяйство и на бытовые нужды.

Претворяя в жизнь лозунг основателя Советского государства В. И. Ленина «Коммунизм — это Советская власть плюс электрификация всей страны», Коммунистическая партия Советского Союза неуклонно проводит курс на электрификацию СССР. Во много раз превзойден первый план Государственной комиссии по электрификации России (ГОЭЛРО), созданной по инициативе В. И. Ленина. Бурный рост электроэнергетики в годы первых пятилеток обеспечил преобразование нашей страны из отсталой аграрно-индустриальной в передовую индустриально-аграрную державу. Несмотря на колоссальный ущерб, причиненный войной, наша страна уже в 1946 г. по выработке электроэнергии вышла на второе место в мире. В 1958 г. у нас выработано электроэнергии в сто раз больше, чем в 1913 г.

Решениями XXI съезда КПСС намечено к 1965 г. увеличить выработку электроэнергии до 500—520 млрд. *квт-ч*, что достигается за счет преимущественного строительства мощных тепловых электростанций. Наряду с этим будут введены новые мощности и продолжено строительство мощных гидростанций, как-то: Братской, Красноярской и др. Протяжение линий электропередач напряжением 35—500 *кв* возрастет в 2,5—3 раза. Будут электрифицированы железные дороги протяжением 20 тыс. *км*, а также рабочие поселки, РТС, совхозы и колхозы.

Грандиозные достижения современной науки, разработавшей методы использования атомной энергии и пославшей в кос-

мос искусственные спутники и ракету с человеком на борту, были бы невозможны без замечательного вклада русских и советских ученых и инженеров в дело теоретического развития и практического освоения электротехники. Наряду с известными именами Максвелла, Фарадея, Ампера, Ома, Кирхгофа, Вольты и ряда других зарубежных ученых и изобретателей в историю электротехники вошли многие славные имена русской науки.

В середине XVIII в. М. В. Ломоносов проводил первые опыты по исследованию электрических явлений. В. В. Петров в 1803 г. издал первую русскую книгу об электричестве, открыл явление электрической дуги и электролиза. В 1838 г. петербургский ученый Б. С. Якоби применил первый электродвигатель. В 1873 г. А. Н. Лодыгин изобрел электрическую лампу накаливания. В 1876 г. П. Н. Яблочков создал «электрическую свечу», а затем трансформатор. Весьма важны работы русских ученых П. Л. Шиллинга по созданию телеграфа, Э. Х. Ленца — по электромагнитной индукции и тепловому действию тока, А. Г. Столетова — по намагничиванию тел и исследованию фотоэффекта, Н. Г. Славянова и Н. Н. Бенардоса — по электросварке и др.

Особенно велика роль М. О. Доливо-Добровольского — создателя энергетики трехфазного тока и изобретателя беспроводного телеграфа (радиотелеграфа) А. С. Попова.

В развитие электротехники и строительство электрических станций и электроприводов сделали большой вклад советские ученые и инженеры С. И. Вавилов, А. Ф. Иоффе, И. Г. Александров, Г. О. Графтио, А. В. Винтер, Б. Е. Веденеев, С. Я. Жук и многие другие.

Широкое применение получила электрическая энергия на речном транспорте. Применение электропривода для судовых вспомогательных механизмов, электродвижение речных судов, механизация и автоматизация погрузочно-разгрузочных работ, применение дизель-электрических землесосных, многочерпаковых и скалоуборочных снарядов, электрификация речной обстановки, автоматизация и телемеханизация шлюзов, гидроэлектрических и насосных станций и других гидротехнических сооружений — вот неполный перечень использования достижений электротехники на речном транспорте.

Большая задача стоит перед строителями и эксплуатационниками транспортных гидротехнических сооружений в текущем семилетии и в последующие годы. Предстоит завершить строительство и освоение крупнейших волжских и камских гидроузлов, шлюзов Волго-Балтийского водного пути и грандиозных гидросооружений на сибирских реках. Будет повышен уровень автоматизации и телемеханизации шлюзов, насосных станций и ГЭС. Все это требует от специалистов-гидротехников глубокого изучения и хорошего знания основ электротехники и современного электропривода.

ГЛАВА I

ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ И ЕГО ПАРАМЕТРЫ

Из физики известно, что тело является электрически нейтральным, если в нем число отрицательно заряженных частиц — электронов равняется числу положительно заряженных частиц — протонов. Избыток или недостаток электронов определяет отрицательный или положительный заряд тела, который количественно оценивается по силовому взаимодействию тел, обладающих электрическими зарядами. Заряд электрона чрезвычайно мал, поэтому практически пользуются в $6,29 \cdot 10^{18}$ раз большей единицей измерения электрического заряда (количества электричества), называемой кулоном (κ). В дальнейшем все единицы измерения электрических величин даются в практической системе МКСА (метр—килограмм—секунда—ампер).

На электрические заряды оказывает силовое воздействие окружающее их электрическое поле, которое, как и магнитное поле, является одним из проявлений единого электромагнитного поля. Электромагнитное поле — это особый вид материи, отличающийся непрерывным распространением в пространстве (электромагнитные волны), характеризующийся способностью распространения в вакууме со скоростью около $3 \cdot 10^8$ м/сек, а также оказывающий силовое воздействие на заряженные частицы. Величинами, характеризующими физическое состояние электрического поля, являются напряженность и потенциал этого поля.

Напряженность поля численно равна силе, действующей на единичный заряд в данной точке поля:

$$E = \frac{F}{Q}, \quad (1)$$

где F — сила, действующая на заряд;
 Q — величина заряда.

Таким образом, чем больше сила F , с которой электрическое поле действует на заряд Q , внесенный в его пределы, тем больше напряженность поля. В различных точках электрического поля напряженность поля может быть различна.

Потенциал в какой-либо точке электрического поля численно равен работе, совершаемой силами поля при перемещении единичного заряда из данной точки за пределы поля.

Работа по переносу единичного заряда из точки с одним потенциалом в точку с другим потенциалом численно равна разности потенциалов, называемой напряжением. Напряжение обозначается буквой U и измеряется в вольтах (v).

§ 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК И ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА

Проводники и диэлектрики. Тела в природе по своим электрическим свойствам можно разделить на проводники, полупроводники и непроводники. В атомах проводников один или несколько электронов вращаются по растянутым орбитам, на которых они неустойчивы и с которых легко могут срываться, попадая в межатомное пространство. Такие электроны, в отличие от планетарных (связанных) электронов, вращающихся вокруг атомных ядер, называются свободными электронами. Тела, имеющие большое количество свободных электронов, называются проводниками первого рода и обладают электропроводностью. К ним относятся металлы, их сплавы и уголь.

К проводникам второго рода относятся электролиты—растворы кислот, щелочей и солей, характеризующиеся ионной проводимостью. В этих проводниках под действием растворителя протекает непрерывный процесс диссоциации, т. е. расщепление нейтральных молекул на разноименные ионы, которые беспорядочно движутся с большими или меньшими скоростями, зависящими от их температуры. В результате столкновений разноименных ионов образуются нейтральные молекулы, которые затем вновь расщепляются на ионы, и т. д. В нормальных условиях электролит нейтрален, так как в каждый момент разноименные ионы нейтрализуют друг друга.

Наряду с проводниками не менее важное значение в электротехнике имеют диэлектрики, которые обладают хорошими изоляционными свойствами. К ним относятся слюда, фарфор, эбонит, резина, шелк, многие масла и смолы, различные пластмассы, дистиллированная вода и др. Эти вещества характеризуются тем, что в них почти нет свободных электронов.

Промежуточное положение между проводниками и диэлектриками занимают полупроводники, нашедшие за последние годы широкое применение как в электротехнике, радиотехнике, так и в свето- и теплотехнике. К полупроводникам относятся графит, кремний, германий, селен, таллий, кадмий и др.

Электрический ток. Если к концам проводника приложить разность потенциалов, то на беспорядочно движущиеся свободные электроны будет оказывать действие электрическое поле, в результате чего электроны начнут перемещаться поступательно вдоль поля.

Направленное движение свободных электронов в проводнике называется электрическим током проводимости или, короче, электрическим током.

Под влиянием меняющегося электрического поля в диэлектрике происходит деформация кристаллической решетки (смещения орбит планетарных электронов) и создается электрический ток поляризации, иногда называемый током смещения.

Электрический ток, обозначаемый буквой I , определяется перемещением зарядов, т. е. количеством электричества Q , которое проходит через поперечное сечение проводника в единицу времени t и выражается следующей формулой:

$$I = \frac{Q}{t} a. \quad (2)$$

За единицу тока принят ампер (a).

Ампер — это такая величина тока, при которой за каждую секунду через поперечное сечение проводника перемещается заряд, равный одному кулону. Количество протекающего электричества равняется произведению тока на время перемещения зарядов. Поэтому кулон также называют ампер-секундой ($a \cdot \text{сек}$).

Замкнутый путь, по которому перемещаются электрические заряды, носит название электрической цепи.

Если количество электричества и направление движения его не меняются во времени, то такой ток называется постоянным.

Электрический ток, имеющий постоянное направление, мгновенные значения которого периодически повторяются, называется пульсирующим.

Электродвижущая сила. Для создания направленного перемещения зарядов в замкнутой цепи проводника, т. е. для получения электрического тока, необходимо иметь постоянную разность потенциалов на зажимах проводника и сообщать свободным электронам проводника энергию, необходимую на их перемещение. Эту задачу выполняют различные источники тока: гальванические элементы, аккумуляторы, генераторы постоянного или переменного тока.

Во всех этих случаях один из зажимов источника тока имеет избыток электронов ($-$), а другой — недостаток их ($+$). При этом между зажимами существует электрическое поле и, следовательно, разность потенциалов. Если зажимы соединить проводником, то по нему потечет электрический ток — поток электронов в направлении от ($-$) к ($+$). Однако по причинам, связанным с историческим развитием электротехники, принято считать ток направленным от ($+$) к ($-$). В проводниках вто-

рого рода (жидких и газообразных) движение положительных ионов совпадает с условным направлением электрического тока.

Всякий источник тока характеризуется электродвижущей силой (э. д. с.), которая равна разности потенциалов между зажимами источника тока при разомкнутой внешней цепи. Э. д. с. численно равна запасу энергии, которую источник может расходовать на перемещение единичного заряда по замкнутой цепи.

Источник э. д. с. (источник тока), в котором происходит преобразование механической, химической или другой энергии в электрическую, называется генератором электрической энергии. Очевидно, что энергия, выработанная генератором, $W = EQ$, расходуется на всех участках замкнутой электрической цепи генератора. Если напряжение на зажимах генератора обозначить через U , то во внешней цепи расходуется часть энергии, переходящая в другие виды:

$$W_1 = UQ. \quad (3)$$

Другая часть энергии генератора, которую можно выразить

$$W_2 = W - W_1 = EQ - UQ = (E - U)Q = U_0 Q, \quad (4)$$

бесполезно расходуется внутри на нагревание.

Выражение в скобках $(E - U)$ есть разность между э. д. с. и напряжением источника, называемая внутренним падением напряжения U_0 . Отсюда

$$E = U + U_0, \quad (5)$$

т. е. электродвижущая сила генератора равна сумме внешнего и внутреннего падения напряжений.

§ 3. ЗАКОН ОМА

Сопротивление и проводимость твердых проводников. Направленному движению электронов в замкнутой электрической цепи препятствуют частые столкновения с беспорядочно движущимися атомами и связанными с ними электронами проводника.

Совокупность препятствий потоку свободных электронов на пути его движения по проводнику называется электрическим сопротивлением, обозначается буквой r или R и измеряется в омах (ом).

Сопротивление проводника прямо пропорционально его длине l и обратно пропорционально его сечению s и выражается формулой

$$r = \rho \frac{l}{s} \text{ ом}, \quad (6)$$

где ρ — удельное сопротивление материала.

За единицу сопротивления принят ом, равный сопротивлению ртутного столбика длиной 106,3 см, с поперечным сечением 1 мм² при температуре 0° С. Сопротивление проводника дли-

ной 1 м, с поперечным сечением 1 мм², при температуре 20° С называется удельным сопротивлением.

Величина, обратная сопротивлению, называется проводимостью. Если сопротивление проводника равно r , то его проводимость будет

$$g = \frac{1}{r}. \quad (7)$$

Величина, обратная удельному сопротивлению, называется удельной проводимостью:

$$\gamma = \frac{1}{\rho}. \quad (8)$$

Зависимость сопротивления от температуры. Опыт показывает, что с повышением температуры сопротивление проводников первого рода увеличивается. Зависимость сопротивления проводника от температуры характеризуется температурным коэффициентом α , который указывает, насколько изменяется сопротивление проводника в 1 ом при повышении его температуры на 1° С.

Для химически чистых металлов $\alpha = 0,004 \frac{1}{\text{град}}$.

Допустим, что при начальной температуре Θ_1 проводник обладал сопротивлением r_0 ом. При повышении температуры на 1° приращение сопротивления составит αr_0 . При повышении же температуры до Θ_2 , т. е. на $(\Theta_2 - \Theta_1)^\circ \text{С}$, приращение сопротивления станет равным $\alpha r_0 (\Theta_2 - \Theta_1)$, а полное сопротивление

$$r = r_0 + \alpha r_0 (\Theta_2 - \Theta_1) = r_0 \{1 + \alpha (\Theta_2 - \Theta_1)\}. \quad (9)$$

При повышении температуры твердых проводников увеличивается их сопротивление, что объясняется возрастанием скорости и амплитуды колебательного движения атомов. При этом свободные электроны будут чаще сталкиваться с атомами и связанными с ними электронами проводника.

Специальные сплавы (никелин, манганин, константан, нихром, фехраль и др.) характеризуются высоким удельным сопротивлением. Некоторые из них (манганин, константан) отличаются крайне малым температурным коэффициентом и широко применяются в измерительных приборах. Отдельные сплавы выдерживают высокие температуры и используются в нагревательных приборах (нихром, фехраль и др.).

Удельное сопротивление проводников имеет широкий диапазон и составляет $\left(\text{в } \frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}} \right)$ для серебра 0,0159, меди — 0,0175, алюминия — 0,0287, железа — 0,132, никелина — 0,332, константана — 0,48, нихрома — 1,11, а для угля — 10,0.

Закон Ома. Закон Ома является одним из основных законов электротехники. Он устанавливает зависимость тока I от э. д. с. источника E и сопротивления всей замкнутой цепи r :

$$I = \frac{E}{r_1 + r_0} = \frac{E}{r} \quad a, \quad (10)$$

где r_1 — сопротивление внешней цепи;

r_0 — внутреннее сопротивление источника тока.

Этот закон можно сформулировать так: ток в замкнутой цепи прямо пропорционален электродвижущей силе источника и обратно пропорционален сопротивлению всей цепи. Из формулы (10) следует:

$$E = I r_1 + I r_0, \quad (11)$$

что тождественно выведенному ранее выражению (5).

Из равенства (11) следует, что напряжение на зажимах генератора равняется его э. д. с. за вычетом внутреннего падения напряжения:

$$U = E - U_0 = E - I r_0. \quad (12)$$

При разомкнутой цепи генератора напряжение на зажимах генератора равно его э. д. с., так как ток, а следовательно, и внутреннее падение напряжения равняются нулю.

Из формул (11) и (5) имеем

$$I = \frac{U}{r_1}. \quad (13)$$

Таким образом, ток на участке цепи прямо пропорционален напряжению на нем и обратно пропорционален его сопротивлению. Эту формулу именуют законом Ома для участка цепи.

§ 4. РАБОТА И МОЩНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Из выведенных ранее выражений (3) и (4) видно, что работа электрического тока пропорциональна величине перенесенного заряда Q и приложенного напряжения, т. е. $A = UQ$. Используя закон Ома и заменяя заряд Q равной ему величиной It , выводим другие выражения для работы тока во внешней и внутренней цепи:

$$A = UQ = UIt = I^2 r t = \frac{U^2}{r} t. \quad (14)$$

Мощностью P называется работа в единицу времени:

$$P = \frac{A}{t} = \frac{UIt}{t} = UI = I^2 r = \frac{U^2}{r} \text{ вт}. \quad (15)$$

Мощность измеряется в ваттах (вт) и киловаттах (квт).

Поскольку работа равна произведению мощности на время:

$$A = Pt \text{ дж}, \quad (16)$$

то единица работы — джоуль (дж) может быть названа также ватт-секундой, а единица мощности ватт — джоулем в секунду.

Обычно пользуются следующими единицами измерения для работы и мощности: $1 \text{ кГм} = 9,8 \text{ дж}$; $1 \text{ квт-ч} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ дж}$; $1 \text{ л. с.} = 75 \text{ кГм/сек}$; $1 \text{ квт} = 1,36 \text{ л. с.}$

Закон Ленца—Джоуля. Зависимость между током и выделяемым им количеством тепла была открыта русским академиком Ленцем и английским ученым Джоулем. Эта зависимость выражается формулой

$$Q = 0,24 I^2 r t \text{ кал}, \quad (17)$$

где 0,24 — тепловой эквивалент джоуля в калориях (кал).

Таким образом, количество тепла Q , выделяемого током в проводнике, пропорционально квадрату тока I , сопротивлению проводника r и времени прохождения тока t .

Тепловые действия электрического тока используются для различных целей: в электрических печах, нагревательных приборах, приборах защиты (тепловые реле и т. д.). В ряде случаев выделение электрическим током тепла следует всемерно уменьшать во избежание бесполезных затрат энергии и повреждения оборудования электроустановок, например, чрезмерный нагрев и пробой изоляции проводов и кабелей, повреждение обмоток электрических машин и электроаппаратов и др.

§ 5. СПОСОБЫ СОЕДИНЕНИЯ ПРИЕМНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Приемники электрической энергии (электродвигатели, лампы накаливания, нагревательные приборы и др.) имеют различное сопротивление и в зависимости от условий работы соединяются между собой последовательно, параллельно или смешанно.

Последовательное соединение.

При последовательном соединении конец первого сопротивления r_1 соединяется с началом второго сопротивления r_2 , конец второго сопротивления — с началом третьего r_3 и т. д. (рис. 1). Потенциалы в точках A , B , C и D соответственно обозначим через φ_A ; φ_B ; φ_C и φ_D , а напряжения на участках цепи и полное

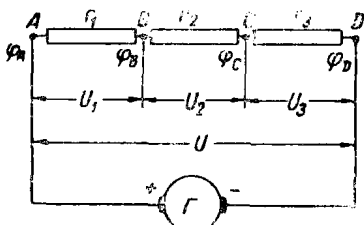


Рис. 1. Последовательное соединение сопротивлений

напряжение через U_1 ; U_2 ; U_3 и U ; тогда для каждого сопротивления (приемника) можно написать:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_A - \varphi_B &= Ir_1 = U_1; \\ \varphi_B - \varphi_C &= Ir_2 = U_2; \\ \varphi_C - \varphi_D &= Ir_3 = U_3. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

После сложения этих равенств получим:

$$\varphi_A - \varphi_D = I(r_1 + r_2 + r_3) = U_1 + U_2 + U_3 = U. \quad (19)$$

Обозначив сопротивление цепи между точками A и D через r , можно написать

$$\varphi_A - \varphi_D = Ir = U.$$

Из сравнения двух последних выражений вытекает

$$r = r_1 + r_2 + r_3. \quad (20)$$

Таким образом, при последовательном соединении приемников полное падение напряжения равно сумме падений напряжения на отдельных участках цепи (19). С другой стороны, общее сопротивление рассматриваемой цепи равно сумме сопротивлений ее участков. Из равенства (20) видно, что сопротивления r_1 , r_2 и r_3 можно заменить одним эквивалентным сопротивлением R , отчего ток в цепи не изменится.

Из равенств (18) следует, что

$$U_1 : U_2 : U_3 = r_1 : r_2 : r_3, \quad (21)$$

т. е. напряжения на участках цепи пропорциональны их сопротивлениям. Умножив обе части равенства (20) на I^2 , получим

$$I^2 r = I^2 r_1 + I^2 r_2 + I^2 r_3,$$

т. е. общая мощность равна сумме мощностей, потребляемых отдельными участками цепи, а мощности участков цепи пропорциональны их сопротивлениям:

$$P_1 : P_2 : P_3 = r_1 : r_2 : r_3. \quad (22)$$

Параллельное соединение. На рис. 2, *a* показано параллельное соединение, когда к точке A , называемой узловой точкой, притекают токи I_1 и I_2 . От этой же точки вытекают токи I_3 , I_4 и I_5 .

Первый закон Кирхгофа гласит, что в узловой точке цепи сумма токов притекающих равна сумме токов вытекающих. Таким образом,

$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4 + I_5, \text{ или } I_1 + I_2 - I_3 - I_4 - I_5 = 0,$$

т. е.

$$\Sigma I = 0. \quad (23)$$

Последнее выражение также является первым законом Кирхгофа, который более кратко формулируется так: в узловой точке цепи алгебраическая сумма токов равна нулю.

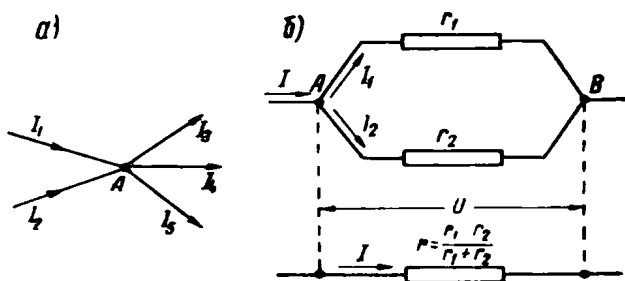


Рис. 2. Параллельное соединение сопротивлений

На рис. 2,б два сопротивления r_1 и r_2 соединены между собой параллельно.

Ток I в точке A растекается по двум ветвям на токи I_1 и I_2 , называемые разветвленными токами. Обе ветви включены на общее напряжение U , и падения напряжения в ветвях равны между собой

$$U = I_1 r_1 = I_2 r_2. \quad (24)$$

Преобразуя последнее равенство и учитывая равенство (7), получим

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2}{r_1} = \frac{g_1}{g_2}. \quad (25)$$

Из формулы видно, что в параллельных ветвях токи распределяются обратно пропорционально сопротивлениям ветвей, или, что то же, прямо пропорционально их проводимостям.

Далее, относительно узловой точки A по первому закону Кирхгофа имеем

$$I = I_1 + I_2. \quad (26)$$

Обозначая эквивалентное полное сопротивление цепи через r , можем согласно закону Ома написать выражения для общего тока и токов в ветвях:

$$I = \frac{U}{r}; \quad I_1 = \frac{U}{r_1}; \quad I_2 = \frac{U}{r_2}.$$

После подстановки последних формул в равенство (26) и сокращения на U получим выражение для проводимости

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}. \quad (27)$$

В общем случае, при числе ветвей n , формулы общей проводимости имеют вид

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \dots + \frac{1}{r_n} \quad (28)$$

или

$$g = g_1 + g_2 + \dots + g_n. \quad (29)$$

Равенство (29) показывает, что общая проводимость параллельно соединенных приемников равна сумме проводимостей всех ветвей. Формулой проводимости пользуются при определении эквивалентного сопротивления разветвления.

При определении эквивалентного сопротивления двух параллельных ветвей удобнее пользоваться формулой

$$r = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}. \quad (30)$$

Ее можно выразить следующим образом: *сопротивление двух параллельно соединенных приемников равно произведению сопротивлений этих приемников, деленному на сумму тех же сопротивлений.*

При параллельном соединении n одинаковых сопротивлений (приемников) эквивалентное сопротивление этого участка цепи в n раз меньше сопротивления отдельной ветви:

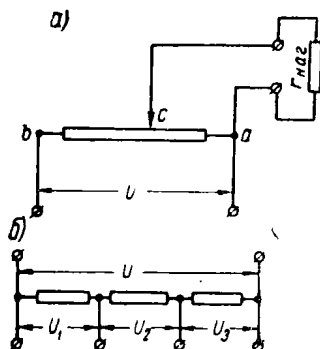


Рис. 3. Виды соединений сопротивлений:

a — потенциометр; $б$ — делитель напряжения

$$r = \frac{r_1}{n}. \quad (31)$$

Потенциометр. Делитель напряжений. Для плавного изменения напряжения от нуля до напряжения U сети пользуются прибором, называемым потенциометром. В качестве потенциометра может быть использован ползунковый реостат, включенный для этого по схеме рис. 3, a . Напряжение на зажимах приемника является частью напряжения сети U и зависит от положения ползунка. Если плавной регулировки

напряжения на приемниках не требуется, тогда пользуются делителями напряжения (рис. 3, $б$).

Смешанное соединение. Если цепь состоит из последовательно и параллельно соединенных приемников электрической энергии, то такое соединение называется смешанным. В качестве примера рассмотрим цепь, состоящую из двух параллельных ветвей, в каждой из которых имеется несколько последователь-