

# **Лекция 1.**

**Основные понятия об  
электрических цепях. Расчет и  
анализ однофазных  
электрических цепей.**

## Цепи постоянного тока. Электрическая цепь

Одна из важнейших задач электротехники — передача энергии на ближние и дальние расстояния. С этой целью энергия падающей воды, топлива или других источников превращается в электрическую энергию, которая по проводам линии передачи подводится к потребителю. У потребителя электрическая энергия снова преобразуется в тепловую, механическую, химическую, световую и др.

Источники электрической энергии, соединенные проводами с потребителями, образуют **электрическую цепь**.

Таким образом, электрическая цепь состоит из **следующих основных элементов**:

а) одного или нескольких источников электрической энергии, преобразующих энергию какого-либо вида в электрическую (генератор, аккумуляторная батарея, термоэлемент);

б) одного или нескольких приемников, преобразующих электрическую энергию в энергию других видов (электрический двигатель, электролитическая ванна, электрическая печь);

в) проводов.

Кроме того, в электрическую цепь обычно включаются коммутационная аппаратура и устройства защиты сети. Коммутационные устройства предназначены для включения и выключения отдельных элементов цепи, а автоматы защиты и плавкие предохранители разрывают цепь при возникновении аварийных режимов работы.

Будем называть **простой** (неразветвленной) электрической цепью замкнутый контур, образованный источником электрической энергии, двумя проводами и приемником (потребителем) энергии (рисунок 1.1). В **разветвленной** электрической цепи всегда можно выделить несколько контуров, в том числе и не содержащих источников электроэнергии.

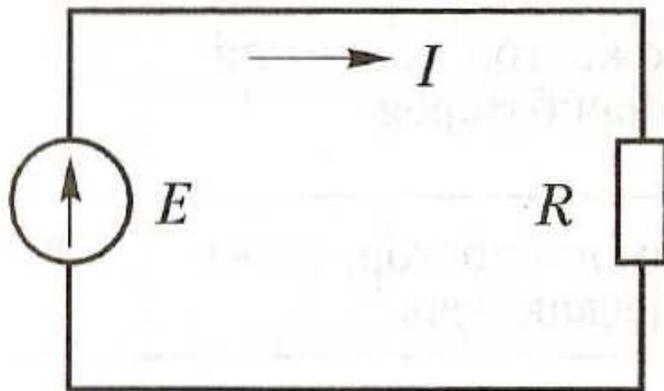


Рисунок 1.1 – Простая (неразветвленная) электрическая цепь

В источнике электрической энергии возникает сила, способная перемещать электрические заряды вдоль замкнутого контура, имеющего конечное сопротивление. Работа, совершаемая этой силой при переносе единичного положительного заряда от плюсового зажима источника к минусовому, называется **электродвижущей силой**.

Электродвижущую силу сокращенно называют ЭДС и обозначают буквой  $E$ . Направление ЭДС совпадает с направлением движения положительных зарядов, которые перемещаются от плюсового зажима источника электрической энергии через приемник к минусовому зажиму источника и далее внутри источника от минусового зажима к плюсовому.

## Электрический ток

Движущиеся заряды образуют в цепи электрический ток, направление которого совпадает с направлением движения положительных электрических зарядов. Опыт показывает, что в стационарном режиме нигде в цепи не происходит накопление зарядов. Следовательно, путь тока всегда имеет вид замкнутого контура.

Электрический ток количественно характеризуют **силой тока  $I$** . Если величина тока с течением времени не меняется, то ее величина определяется выражением

$$I = \frac{Q}{t},$$

Где  $Q$  – количество электричества (заряд), прошедшее через поперечное сечение проводника за время  $t$ .

Единица измерения тока – ампер (А), заряда – кулон (Кл).

Обычно в некотором объеме вещества наибольшей подвижностью обладают электроны, вместе с которыми под действием ЭДС перемещается отрицательный заряд. В электролитах могут свободно перемещаться как отрицательно, так и положительно заряженные ионы.

Таким образом, под **силой тока** понимают количество электричества (заряд), переносимое заряженными частицами через поперечное сечение проводника в единицу времени.

## Электрическое напряжение. Закон Ома

**Электрическое напряжение** между точками *a* и *б* равно работе, совершаемой источником ЭДС при перемещении единичного положительного заряда из точки *a* в точку *б*.

$$U = \frac{A}{Q} = \frac{Fl}{Q}$$

Здесь  $U$  — напряжение между точками *a* и *б*;  $A$  — работа, совершаемая при перемещении заряда из точки *a* в точку *б*;  $F$  - сила, действующая на заряд  $Q$ ;  $l$  - расстояние между точками *a* и *б*.

Единица измерения напряжения – вольт (В).

Направление перемещения положительных зарядов, а следовательно, и направление тока, протекающего в замкнутой цепи, совпадает с направлением ЭДС.

При протекании тока через участок цепи, имеющий сопротивление  $R$ , на концах этого участка возникают потенциалы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , разность которых равна напряжению, падающему на этом участке (рисунок 1.2).

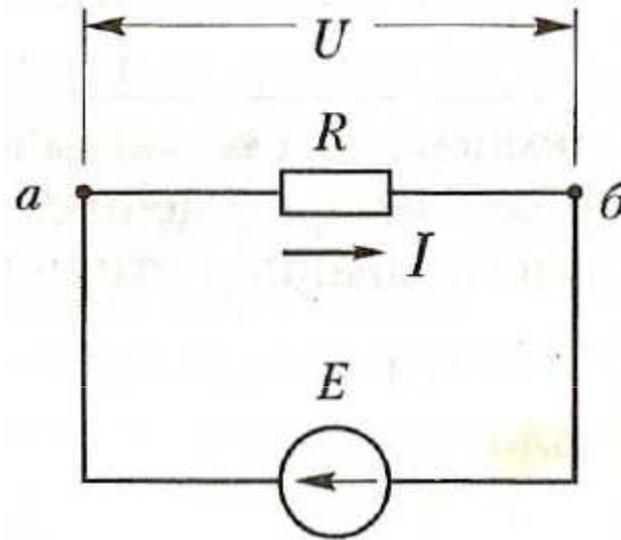


Рисунок 1.2

На каждом участке цепи ток протекает от точки с большим потенциалом к точке с меньшим потенциалом.

Падение напряжения на участке цепи, ток и сопротивление этого участка связаны простой зависимостью, которую называют **законом Ома**:

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

Единица измерения сопротивления – Ом.

Закон Ома справедлив и для всей замкнутой цепи (рисунок 1.3)

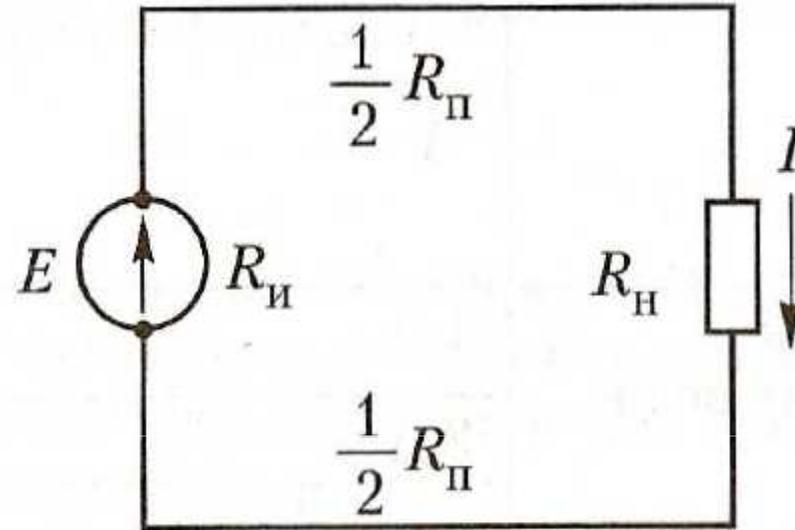


Рисунок 1.3

$$I = \frac{E}{R_{и} + R_{л} + R_{н}}; \quad E = IR_{и} + I(R_{л} + R_{н}).$$

Здесь  $E$  – электродвижущая сила источника электрической энергии;  $R_{и}$  – собственное (внутреннее) сопротивление источника;  $R_{л}$  – сопротивление линии электропередачи;  $R_{н}$  – сопротивление нагрузки (приемника энергии).

## Первый закон Кирхгофа

Электрическая цепь может иметь сложную форму, содержать несколько источников и большое количество потребителей электрической энергии, соединенных различными способами.

Характерными элементами такой цепи являются ветвь, узел и контур.

**Ветвью** электрической цепи называют участок, в котором ток в данный момент времени имеет одно и то же значение и изменяется одновременно и одинаково на всем протяжении участка. В частном случае ток может оставаться постоянным и одинаковым в пределах всего участка цепи, называемого ветвью.

Ветвь может содержать один или несколько последовательно соединенных источников ЭДС, может совсем не содержать источников ЭДС. Участки  $agf$ ,  $af$ ,  $ab$  и т.д. являются ветвями цепи, изображенной на рисунке 1.4.

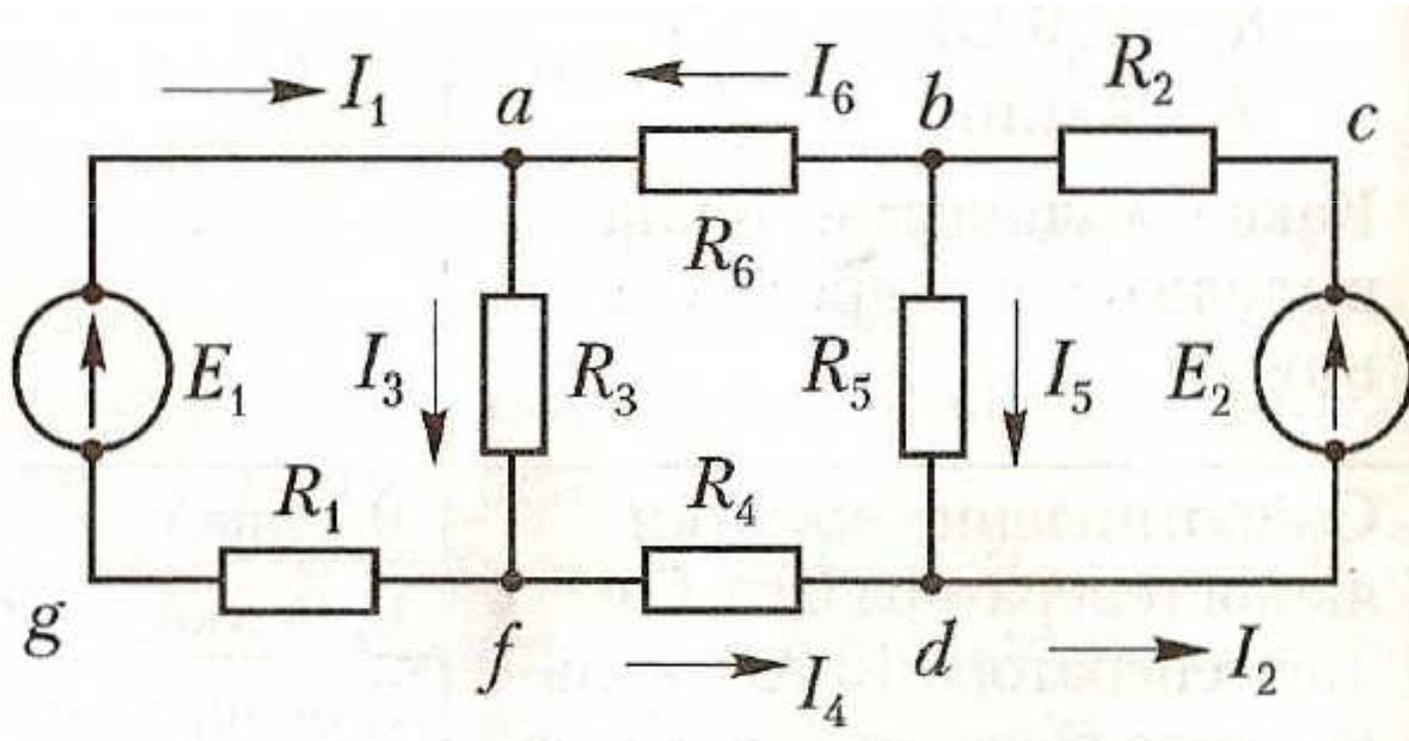


Рисунок 1.4

Точка электрической схемы, представляющая собой место соединения трех или большего числа ветвей, называется **узлом**. В цепи, изображенной на рисунке 1.4, четыре такие точки:  $a$ ,  $b$ ,  $d$ ,  $f$ .

Замкнутая фигура, образованная ветвями электрической цепи, называется **контуром**. В рассматриваемой цепи можно выделить шесть контуров:  $afga$ ,  $abdfa$ ,  $bcdb$ ,  $abdfga$ ,  $abcdfa$ ,  $abcdfga$ .

**Первый закон Кирхгофа** устанавливает, что алгебраическая сумма токов в узле равна нулю:

$$\sum I = 0.$$

Первый закон Кирхгофа непосредственно следует из того факта, что ни в одном узле схемы не происходит накопления электрических зарядов, т.е. количество зарядов, притекающих к узлу в единицу времени, равно количеству зарядов, утекающих от узла.

На рисунке 1.5 изображен узел некоторой сложной цепи.

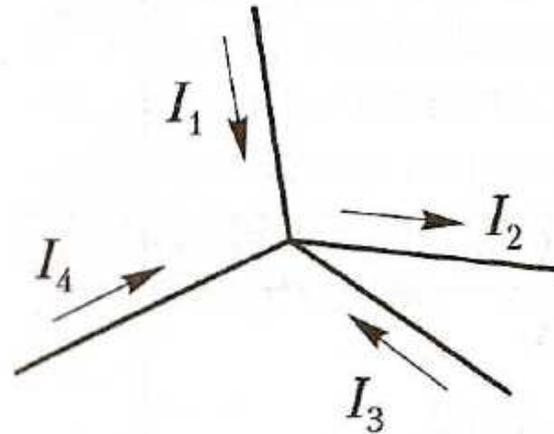


Рисунок 1.5

Условимся токи, приходящие к узлу, считать положительными, а токи, уходящие от узла, — отрицательными. Тогда в соответствии с первым законом Кирхгофа (ЗКТ) можно написать уравнение

$$I_1 + (-I_2) + I_3 + I_4 = 0.$$

$$I_1 + I_3 + I_4 = I_2.$$

Последнее равенство позволяет дать первому закону Кирхгофа несколько иную формулировку: сумма токов, приходящих к узлу, равна сумме токов, уходящих от узла.

## Второй закон Кирхгофа (ЗКН)

**Второй закон Кирхгофа** можно сформулировать следующим образом: в любом контуре электрической цепи алгебраическая сумма ЭДС равна алгебраической сумме падений напряжения на сопротивлениях, входящих в контур:

$$\sum E = \sum IR.$$

При записи уравнения ЗКН необходимо произвольно выбрать направление обхода контура; токи и ЭДС, направление которых совпадает с выбранным направлением обхода, считать положительными, а токи и ЭДС, направление которых противоположно направлению обхода контура, считать отрицательными.

Например, обходя контур *abdfa* против часовой стрелки, запишем (рисунок 1.4):

$$0 = I_3 R_3 + I_4 R_4 - I_5 R_5 + I_6 R_6;$$

Обходя контур *bcdcb* по часовой стрелке, получим

$$-E = -I_2 R_2 - I_5 R_5$$

и т.д. для всех контуров.

Второй закон Кирхгофа выражает тот факт, что в потенциальном поле работа сил поля, совершаемая при обходе зарядом замкнутого контура, равна нулю.

## **Проверка правильности расчета. Баланс мощностей**

При расчете сложных цепей приходится проделывать большую вычислительную работу. Ошибка, совершенная на каком-либо этапе расчета, обычно делает все последующие вычисления недействительными. Поэтому каждую возможность проверки необходимо использовать уже в ходе расчета. Так, например, определив токи в ветвях, образующих контур, следует проверить, выполняется ли второй закон Кирхгофа при найденных числовых значениях; определив токи в ветвях, сходящихся в узле, надо сразу проверить, выполняется ли первый закон Кирхгофа. Указанные проверки необходимы, но недостаточны.

Правильность законченного расчета обязательно должна быть проверена методом баланса мощностей. Из закона сохранения энергии следует, что мощность, отдаваемая источниками питания, должна равняться мощности, потребляемой сопротивлениями ветвей. Следовательно, при правильном расчете цепи должно быть справедливым следующее равенство:

$$E_1 I_1 + E_2 I_2 + \dots + E_k I_k = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + \dots + I_n^2 R_n.$$

Здесь произведение вида  $E_k I_k$  выражает мощность  $i$ -го источника ЭДС. Если направления  $E_k$  и  $I_k$  совпадают, источник отдает мощность в сеть. Если  $E_k$  и  $I_k$  направлены встречно, источник потребляет мощность (например, аккумуляторная батарея в режиме заряда) и произведение  $E_k I_k$  входит в левую часть уравнения со знаком минус.

# Однофазный переменный ток

В отличие от постоянного тока любой изменяющийся ток можно назвать переменным. Однако на практике **переменным током** принято называть ток, изменяющийся с течением времени по синусоидальному закону.

Основная часть электрической энергии, потребляемой в народном хозяйстве, вырабатывается, передается и используется в виде энергии переменного тока.

Это объясняется двумя причинами.

1. Величина переменного тока и величина напряжения, действующего в цепи переменного тока, могут быть легко изменены при помощи экономичного простого и надежного устройства, называемого трансформатором.

2. Генераторы и двигатели переменного тока значительно проще и надежней в эксплуатации, чем генераторы и двигатели постоянного тока.

Эти достоинства переменного тока позволяют строить экономичные и надежные линии передачи энергии тепловых и гидроэлектростанций на дальние расстояния.

## Основные характеристики переменного тока

Переменный ток является синусоидальной функцией времени:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi).$$

В этой записи приняты следующие обозначения:  $i$  — мгновенное значение тока, т.е. значение тока в каждый данный момент времени;  $I_m$  — максимальное (амплитудное) значение тока, т.е. значение тока при условии, что  $\sin(\omega t + \psi) = 1$ , а  $\omega t + \psi = \pi/2$ ;  $\omega$  - угловая частота переменного тока;  $t$  - время, прошедшее с момента начала отсчета;  $\psi$  — начальная фаза переменного тока.

Сила переменного тока непрерывно изменяется с течением времени. Каждому моменту времени соответствует свое определенное значение силы тока — **мгновенное значение**.

Наибольшее из мгновенных значений называется **амплитудой**.

Синусоидальная функция времени является периодической функцией. Ее значения регулярно повторяются через равные промежутки времени. Наименьший промежуток времени, через который мгновенные значения переменного тока начинают повторяться, называется **периодом**. Период обозначают буквой  $T$ , при этом

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi) = I_m \sin[\omega(t + T) + \psi] = I_m \sin[\omega(t + 2T) + \psi] \dots \text{и т.д.}$$

Величина, обратная периоду, называется **частотой**  $f$  переменного тока. Угловая частота  $\omega$  определяется выражением:

$$\omega = 2\pi f.$$

Аргумент синуса ( $\omega t + \psi$ ) называется **фазой** переменного тока. Значение фазы при  $t=0$  называют **начальной фазой**  $\psi$ .

## Закон Ома для цепи переменного тока

Соотношение, связывающее полное сопротивление цепи  $z$ , ток и напряжение на ее зажимах, называют **законом Ома для цепи переменного тока**:

$$z = \frac{U}{I}; I = \frac{U}{z}; U = Iz$$

Здесь  $U$  и  $I$  — действующие значения напряжения и тока.

Закон Ома для цепи переменного тока часто записывают в развернутом виде:

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x^2}} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

Буквой  $r$  обозначают **активное** сопротивление цепи. Его физическая суть - переносящие электрический заряд частицы отдают часть своей энергии молекулам вещества, повышая его температуру.

Символами  $x_L$  и  $x_C$  обозначают **индуктивное** и **емкостное** сопротивления цепи. Эти сопротивления связаны с появлением ЭДС самоиндукции катушки и напряжения на обкладках заряженного конденсатора, препятствующих движению заряженных частиц.

**Полное** сопротивление цепи  $Z$  выражает суммарный эффект действия всех факторов, препятствующих движению заряженных частиц, ограничивающих величину тока в цепи.

В цепи с активным сопротивлением ток и напряжение совпадают по фазе, в цепи с индуктивностью ток по фазе отстает от напряжения на  $90^\circ$ , в цепи с емкостью ток опережает напряжение по фазе на угол  $90^\circ$ .

В общем случае в цепи, содержащей все три элемента, ток может опережать напряжение по фазе (на угол, меньший  $90^\circ$ ), может совпадать по фазе с напряжением и может отставать от напряжения на угол, меньший  $90^\circ$ .

Угол  $\varphi$  проще всего определять по его тангенсу:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{x_L - x_C}{r} = \frac{x}{r}.$$

Угол  $\varphi$  можно определить и из треугольника сопротивлений

$$\sin\varphi = \frac{x}{z}; \quad \cos\varphi = \frac{r}{z}.$$

**Законы Кирхгофа** применимы и для цепей переменного тока. В отличие от постоянного тока, расчеты ведутся с комплексными величинами.

## Мощность в цепи переменного тока

Поскольку ток в цепи и напряжение непрерывно меняются, то и мощность  $p$  — величина переменная.

Среднее значение мощности в цепи переменного тока называют **активной мощностью** и обозначают большой буквой  $P$ . Таким образом,

$$P = UI \cos \varphi.$$

Активная мощность поступает от источника в сеть и преобразуется в ней в другие виды энергии. В цепи с индуктивностью и в цепи с емкостью  $P = 0$ , так как  $\cos(\pm 90^\circ) = 0$ . В цепи с чисто активным сопротивлением  $\varphi = 0$ ,  $\cos\varphi = 1$  и источник отдает в сеть максимально возможную мощность. Это максимальное значение мощности источника называют **полной мощностью** и обозначают буквой  $S$ :

$$S = UI.$$

Треугольник мощностей:

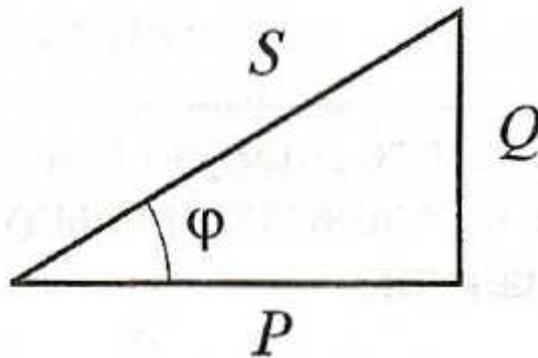


Рисунок 1.6 – Треугольник мощностей

На рисунке 1.6  $Q$  – реактивная мощность.

$$Q = UI \sin \varphi.$$

Из треугольника, показанного на рисунке 1.6, можно найти

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2};$$
$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{UI}.$$

Если с помощью ваттметра измерить активную мощность, а с помощью амперметра и вольтметра — ток и напряжение в сети, то последняя формула позволяет подсчитать  $\cos \varphi$ .