

§ 8. Активное сопротивление

Рассмотрим процессы, происходящие в проводнике, включенном в цепь переменного тока. Если индуктивность проводника настолько мала, что индукционные электрические поля оказываются пренебрежимо малыми по сравнению с внешним электрическим полем, то движение электрических зарядов в проводнике определяется действием только внешнего электрического поля, напряженность которого пропорциональна напряжению на концах проводника.

При изменении напряжения по гармоническому закону

$$u = U_m \cos \omega t \quad (8.1)$$

напряженность электрического поля в проводнике изменяется по такому же закону. Под действием переменного электрического поля в проводнике возникает переменный электрический ток, частота и фаза колебаний которого совпадают с частотой и фазой колебаний напряжения; мгновенное значение силы тока равно:

$$i = I_m \cos \omega t. \quad (8.2)$$

Колебания силы тока в цепи являются вынужденными электрическими колебаниями, возникающими под действием приложенного переменного напряжения. Очевидно, что амплитуда силы тока равна:

$$I_m = \frac{U_m}{R}, \quad (8.3)$$

где R — электрическое сопротивление проводника.

Мощность переменного тока. При совпадении фазы колебаний силы тока и напряжения мгновенная мощность переменного тока равна:

$$p = iu = I_m U_m \cos^2 \omega t. \quad (8.4)$$

Среднее значение квадрата косинуса за период равно 0,5 (рис. 1.25), поэтому среднее значение мощности равно:

$$P = \frac{I_m U_m}{2} = \frac{I_m^2 R}{2}. \quad (8.5)$$

Действующие значения силы тока и напряжения. Для того чтобы формула для расчета мощности переменного тока совпадала по форме с аналогичной формулой для постоянного тока ($P = I^2 R$), вводятся понятия действующих значений силы тока и напряжения.

Действующим значением *силы переменного электрического тока* называют величину, в $\sqrt{2}$ раза меньшую ее амплитудного значения:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (8.6)$$

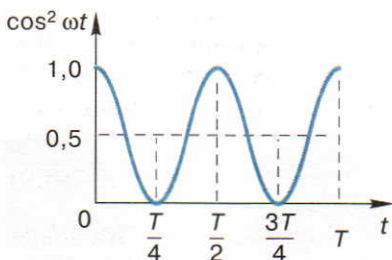


Рис. 1.25

Действующее значение силы тока равно силе такого постоянного тока, при котором средняя мощность, выделяющаяся в проводнике в цепи переменного тока, равна мощности, выделяющейся в том же проводнике в цепи постоянного тока.

Действующее значение переменного напряжения в $\sqrt{2}$ раза меньше его амплитудного значения:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad (8.7)$$

Средняя мощность переменного тока при совпадении фаз колебаний силы тока и напряжения равна произведению действующих значений силы тока и напряжения:

$$P = IU. \quad (8.8)$$

Заметим, что обычно электроизмерительные приборы для цепей переменного тока показывают действующие значения измеряемых величин.

Активное сопротивление. Активным сопротивлением R называется физическая величина, определяемая отношением среднего значения мощности P переменного тока, поглощаемой на участке электрической цепи, к квадрату действующего значения силы электрического тока I на этом участке:

$$R = \frac{P}{I^2}. \quad (8.9)$$

Средняя мощность, выделяющаяся на участке цепи переменного тока, равна произведению квадрата действующего значения силы электрического тока на активное сопротивление R участка цепи:

$$P = I^2 R. \quad (8.10)$$

При небольших значениях частоты переменного тока активное сопротивление проводника не зависит от частоты и практически совпадает с его электрическим сопротивлением в цепи постоянного тока.

■ **Вопросы.** 1. При каком условии колебания силы тока в проводнике совпадают по фазе с колебаниями напряжения в цепи переменного тока? 2. Что такое активное сопротивление? 3. Каково соотношение между активным сопротивлением проводника в цепи переменного тока и его электрическим сопротивлением в цепи постоянного тока?

■ **Задачи для самостоятельного решения**

8.1. Изменится ли активное сопротивление проводника при увеличении частоты переменного тока от 20 до 40 Гц?

8.2. Найдите среднюю мощность, выделяющуюся в резисторе в цепи переменного тока при амплитудном значении силы тока 2 А и амплитудном значении напряжения 30 В.

8.3. Найдите активное сопротивление электрической лампы накаливания, включенной в цепь переменного тока с действующим напряжением 220 В, если при этом на ней выделяется средняя мощность 100 Вт.

§ 9. Индуктивное сопротивление

Катушка в цепи переменного тока. В любом проводнике, по которому протекает переменный ток, возникает ЭДС самоиндукции. Влияние явления самоиндукции на процессы в цепях переменного тока рассмотрим на упрощенном примере. Пусть в цепь переменного тока включена идеальная катушка с электрическим сопротивлением провода, равным нулю. При изменениях силы тока по гармоническому закону:

$$i = I_m \cos \omega t \quad (9.1)$$

в катушке возникает ЭДС самоиндукции:

$$e = -Li' = I_m L \omega \sin \omega t, \quad (9.2)$$

где L — индуктивность катушки; ω — циклическая частота переменного тока.

Так как электрическое сопротивление катушки равно нулю, то ЭДС самоиндукции в ней в любой момент времени равна по модулю и противоположна по знаку напряжению на концах катушки, созданному внешним генератором:

$$u = -e = -I_m L \omega \sin \omega t. \quad (9.3)$$

Следовательно, при изменении силы тока в катушке по гармоническому закону напряжение на ее концах изменяется тоже по гармоническому закону, но со сдвигом фазы:

$$u = I_m L \omega \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right). \quad (9.4)$$

Мы получили, что колебания напряжения на концах катушки опережают по фазе колебания силы тока на $\frac{\pi}{2}$. Произведение $I_m L \omega$ является амплитудой колебаний напряжения на катушке:

$$U_m = I_m L \omega. \quad (9.5)$$

Отношение амплитуды колебаний напряжения на катушке к амплитуде колебаний силы тока в ней называется *индуктивным сопротивлением* и обозначается X_L :

$$X_L = \frac{U_m}{I_m} = L \omega. \quad (9.6)$$

При использовании индуктивного сопротивления X_L связь амплитуды колебаний напряжения на концах идеальной катушки с амплитудой колебаний силы тока в ней совпадает по форме с выражением закона Ома для участка цепи постоянного тока:

$$I_m = \frac{U_m}{X_L}. \quad (9.7)$$

Выражение (9.6) показывает, что индуктивное сопротивление прямо пропорционально частоте переменного тока. Поэтому амплитуда колебаний силы тока в катушке при по-

стоянном значении амплитуды колебаний напряжения обратно пропорциональна частоте.

Зависимость амплитуды колебаний силы тока в катушке от частоты переменного напряжения можно наблюдать в опыте с генератором переменного напряжения, частоту которого можно изменять.

Сдвиг фазы колебаний напряжения на идеальной катушке относительно фазы колебаний силы тока на $\pi/2$ приводит к тому, что мощность переменного тока на катушке в течение периода меняет знак и среднее значение мощности переменного тока на идеальной катушке за период оказывается равным нулю.

Вопросы. 1. Каково соотношение между фазами колебаний силы тока и напряжения в идеальной катушке? 2. Что называется индуктивным сопротивлением? 3. От чего зависит индуктивное сопротивление? 4. Какова средняя мощность переменного тока, протекающего через идеальную катушку?

Задачи для самостоятельного решения

9.1. Вычислите индуктивное сопротивление идеальной катушки индуктивностью 1 мГн на частоте 50 Гц.

9.2. Катушка индуктивностью 0,5 Гн обладает электрическим сопротивлением в цепи постоянного тока, равным 100 Ом. При какой частоте переменного тока индуктивное сопротивление катушки будет в 100 раз больше ее электрического сопротивления в цепи постоянного тока?

9.3. Концы катушки подключили к источнику переменного напряжения с частотой 50 Гц. Действующие значения напряжения и силы тока в цепи при этом соответственно равны 50 В и 0,2 А. Найдите индуктивность катушки. Активное сопротивление катушки пренебрежимо мало.

§ 10. Емкостное сопротивление

Конденсатор в цепи переменного тока. При включении конденсатора в цепь переменного тока процесс его зарядки длится четверть периода. После достижения амплитудного значения напряжения между обкладками конденсатора уменьшается и конденсатор в течение четверти периода разряжается. В следующую четверть периода конденсатор вновь заряжается, но полярность напряжения на его обкладках изменяется на противоположную и т. д. Процессы зарядки и разрядки конденсатора чередуются с периодом, равным периоду колебаний приложенного переменного напряжения.

Как и в цепи постоянного тока, через диэлектрик, разделяющий обкладки конденсатора, электрические заряды не проходят. Но в результате периодически повторяющихся процессов зарядки и разрядки конденсатора по проводам, соединенным с его выводами, течет переменный ток. Лампа накаливания, включенная последовательно с конденсатором в цепь переменного тока (рис. 1.26), кажется горячей непрерывно, так как человеческий глаз при высокой частоте колебаний

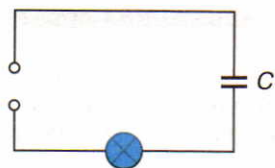


Рис. 1.26

силы тока не замечает периодического ослабления свечения нити лампы.

Установим связь между амплитудой колебаний напряжения на обкладках конденсатора и амплитудой колебаний силы тока. При изменениях напряжения на обкладках конденсатора по гармоническому закону:

$$u = U_m \cos \omega t \quad (10.1)$$

заряд на его обкладках изменяется по закону:

$$q = Cu = U_m C \cos \omega t. \quad (10.2)$$

Электрический ток в цепи возникает в результате изменения заряда конденсатора: $i = q'$. Поэтому колебания силы электрического тока в цепи происходят по закону:

$$i = -U_m \omega C \sin \omega t = U_m \omega C \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right). \quad (10.3)$$

Сравнение выражений (10.1) и (10.3) показывает, что колебания напряжения на обкладках конденсатора в цепи переменного тока отстают по фазе от колебаний силы тока на $\pi/2$.

Произведение $U_m \omega C$ является амплитудой колебаний силы электрического тока:

$$I_m = U_m \omega C. \quad (10.4)$$

Емкостное сопротивление. Отношение амплитуды колебаний напряжения на конденсаторе к амплитуде колебаний силы электрического тока называют *емкостным сопротивлением конденсатора* и обозначают X_C :

$$X_C = \frac{U_m}{I_m} = \frac{1}{C\omega}. \quad (10.5)$$

Связь между амплитудным значением силы электрического тока и амплитудным значением напряжения по форме совпадает с выражением закона Ома для участка цепи постоянного тока, в котором вместо электрического сопротивления фигурирует емкостное сопротивление конденсатора:

$$I_m = \frac{U_m}{X_C}. \quad (10.6)$$

Емкостное сопротивление конденсатора, как и индуктивное сопротивление катушки, не является постоянной величиной. Оно обратно пропорционально частоте переменного тока. Поэтому амплитуда колебаний силы тока в цепи конденсатора при постоянной амплитуде колебаний напряжения на конденсаторе возрастает прямо пропорционально частоте.

Сдвиг фазы колебаний силы тока на $\pi/2$ относительно фазы колебаний напряжения на конденсаторе приводит к тому, что мощность переменного тока на конденсаторе в течение первой половины периода имеет положительный знак, а в те-

чение второй половины — отрицательный. Среднее значение мощности переменного тока на конденсаторе за период оказывается равным нулю. Физический смысл этого результата заключается в том, что сначала за счет работы внешнего генератора происходит зарядка конденсатора и накопление энергии электрического поля, а затем за счет энергии электрического поля конденсатора создается электрический ток противоположного направления. В результате работа электрического тока за период и средняя мощность равны нулю.

■ **Вопросы.** 1. Каково соотношение между фазами колебаний силы электрического тока и напряжения на конденсаторе в цепи переменного тока? 2. Что называется емкостным сопротивлением конденсатора? 3. От чего зависит емкостное сопротивление конденсатора? 4. Какова средняя мощность переменного тока, протекающего через конденсатор?

■ **Задачи для самостоятельного решения**

10.1. Найдите емкостное сопротивление конденсатора электроемкостью 10 мкФ в цепи переменного тока с частотой 50 Гц.

10.2. При какой частоте переменного тока емкостное сопротивление конденсатора электроемкостью 200 нФ будет равно 1 кОм?

10.3. Как изменится емкостное сопротивление конденсатора при уменьшении частоты переменного тока в 4 раза?

10.4. Постройте график зависимости емкостного сопротивления конденсатора от частоты.

10.5. Конденсатор электроемкостью 2 мкФ включен в цепь переменного тока с частотой 50 Гц. Найдите действующее значение силы тока в цепи, если действующее значение напряжения на конденсаторе равно 220 В.

10.6. Какой электроемкостью должен обладать конденсатор для того, чтобы при включении его в цепь переменного тока с частотой 1000 Гц при действующем значении напряжения 2 В действующее значение силы тока в цепи было равно 20 мА?

§ 11. Закон Ома для электрической цепи переменного тока

Последовательная электрическая цепь переменного тока. Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из последовательно соединенных резистора, конденсатора и катушки (рис. 1.27). Если к выводам этой электрической цепи приложить электрическое напряжение, изменяющееся по гармоническому закону с частотой ω и амплитудой U_m , то в цепи возникнут вынужденные колебания силы электрического тока с той же частотой и некоторой амплитудой I_m . Установим связь между амплитудами колебаний силы тока и напряжения.

В любой момент времени сумма мгновенных значений напряжений на последовательно включенных элементах цепи равна мгновенному значению приложенного напряжения:

$$u = u_R + u_L + u_C. \quad (11.1)$$