

Тема 20

**Получение переменной ЭДС.
Сопротивление, индуктивность и
емкость в цепи переменного тока.
Закон Ома для цепей переменного
тока. Резонанс в последовательной
и параллельной цепи. Проблема
передачи электроэнергии на
расстояние, трансформатор**

ОГЛАВЛЕНИЕ

20.1. Получение переменной ЭДС.

20.2. Сопротивление, индуктивность и емкость в цепи переменного тока. Закон Ома для цепей переменного тока.

20.3. Резонанс в последовательной и параллельной цепи.

20.4. Проблема передачи электроэнергии на расстояние, трансформатор.

20.1. Получение переменной ЭДС

Рассмотрим контур ABCD, вращающийся с частотой ω , в постоянном магнитном поле, причем AB(CD) всегда перпендикулярна направлению поля.

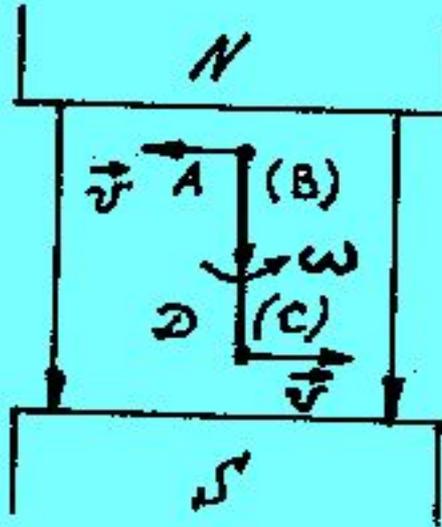


Рис.20.1.

При этом на электроны в контуре действует сила Лоренца, направление которой указано на рисунке 20.2.

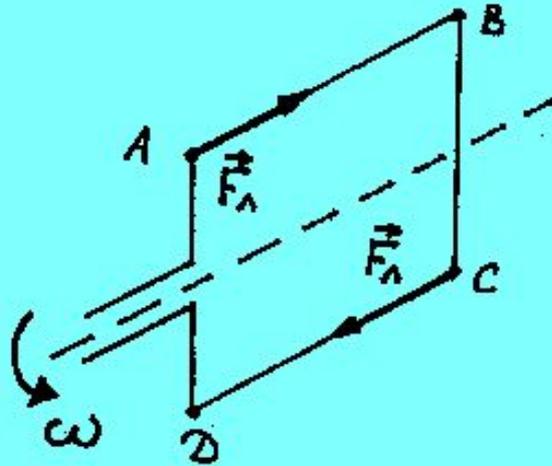


Рис. 20.2.

Под действием этой силы электроны в контуре приходят в движение, т. е. возникает электрический ток

{ от В к А
от Д к С

и спустя $t = \frac{T}{2}$

{ от С к Д
от А к В

Через половину периода направление тока в рамке изменяется на противоположное. Угол поворота рамки определится как:

$$\phi = \omega t.$$

По закону Фарадея, ЭДС в контуре определяется соотношением:

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = -L \frac{di}{dt} = -\frac{d\Phi}{dt},$$

где $\Phi = BS \cos \phi$ – магнитный поток, пронизывающий рамку.

Получим:

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= -\frac{d}{dt}(BS \cos \phi) = -\frac{d}{dt}(BS \cos \omega t) = BS\omega \sin \omega t = \\ &= E_m \sin \omega t, \quad \text{где } E_m = BS\omega. \end{aligned}$$

Вывод: ЭДС индукции в рамке изменяется по гармоническому закону.

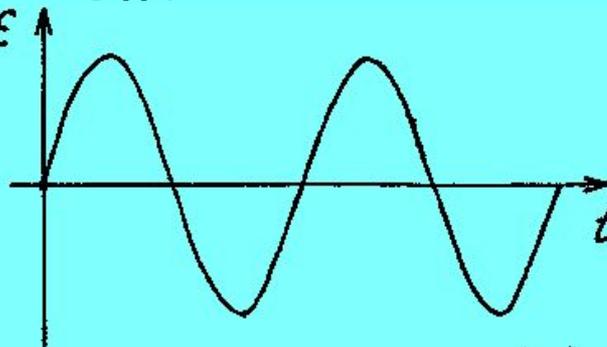


Рис.20.3.

20.2. Сопротивление, индуктивность и емкость цепи переменного тока. Закон Ома для цепей переменного тока

Опыт 20.1. Сдвиги фаз в цепи с емкостью и индуктивностью

Оборудование:

1. Осциллограф электронный.
2. Коммутатор к осциллографу.
3. Батарея конденсаторов на 60 мкФ.
4. Катушка дроссельная с сердечником.
5. Реостат на 500 Ом.
6. Лампа на 127 В, 60 Вт на подставке с зажимами.
7. Проводники соединительные.
8. Ящик – подставка.

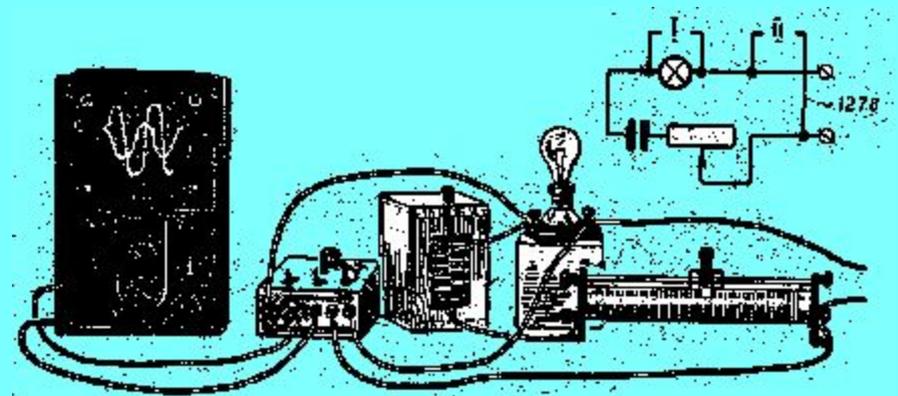


Рис.20.4.

Ход работы:

- 1.Собрать схему рис.20.4.
- 2.Катушка индуктивности, установленная на стенде, имеет значительное активное сопротивление, которое следует учитывать в дальнейших измерениях.
- 3.Конденсатор, установленный на стенде, не является идеальным, т.е. в процессе работы он дает утечки тока через изоляцию
- 4.Для наблюдения явления резонанса можно следить за изменением в зависимости от частоты
5. Включите генератор и дайте ему прогреться несколько минут.
- 6.Особо следует определить точное значение резонансной частоты. Для этого надо, медленно вращая ручку регулировки частоты в диапазоне и внимательно наблюдая за показаниями амперметра, «поймать» частоту, при которой сила тока в цепи принимает максимальное значение. Значение резонансной частоты заносится в отчет.
7. Находясь на резонансной частоте, измерьте падение напряжения на конденсаторе
- 8.С помощью осциллографа определить сдвиги фаз.

Вывод: между током и напряжением существует фазовый сдвиг

Активное сопротивление в цепи переменного

тока

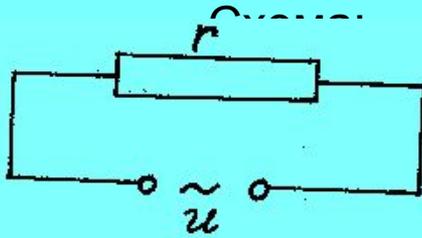


Рис. 20.5.

Для данной цепи: $U = U_0 \sin \omega t$.

По закону Ома

$$I = \frac{U}{r} = \frac{U_0}{r} \sin \omega t = I_0 \sin \omega t, \quad \text{где } I_0 = \frac{U_0}{r} -$$

амплитудное значение тока.

Вывод: ток и напряжение совпадают по фазе.

График:

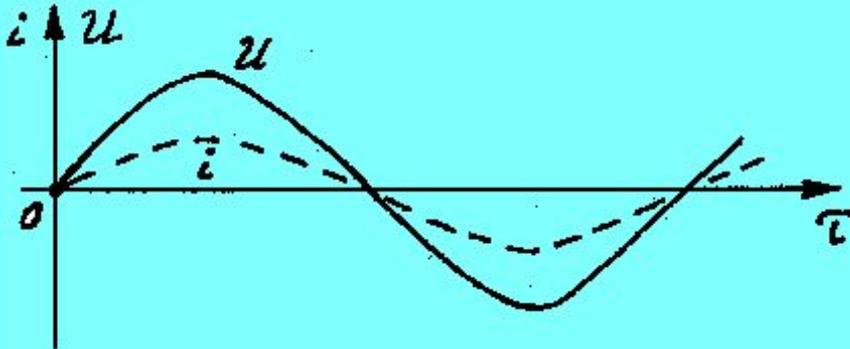


Рис. 20.6.

Векторная диаграмма:

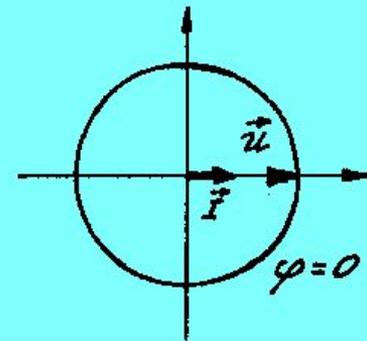


Рис. 20.7.

В цепи происходит необратимый процесс преобразования энергии электрического тока в тепловую энергию (нагрев).

Индуктивность в цепи переменного тока

Индуктивным элементом называется элемент, преобразующий энергию электрического тока в энергию магнитного поля, окружающего проводник.

В отличие от предыдущего случая, этот процесс является обратимым, т. е. энергия источника переходит в энергию магнитного поля, затем энергия магнитного поля возвращается в цепь в виде энергии электрического тока. Индуктивный элемент называют реактивным, т. к. он характеризует реакцию электрической цепи на протекание в ней электрического тока.

Схема:

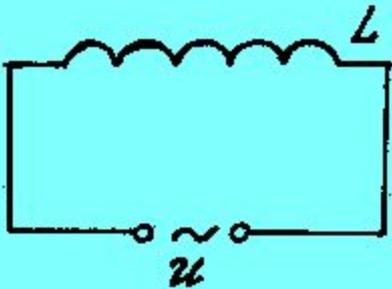


Рис. 20.8.

Запишем второй закон Кирхгофа для этой цепи. ЭДС самоиндукции будет полностью компенсировать падение напряжения на концах катушки:

$$U_L + E_C = 0 \Rightarrow U_L = -E_C = L \frac{di}{dt}.$$

Имеем:

$$i = I_0 \sin \omega t \Rightarrow U = LI_0 \omega \cos \omega t = U_0 \cos \omega t,$$

где $U_0 = LI_0 \omega$ – амплитуда напряжения.

Запишем U_0 в виде:

$$U_0 = RI_0 = X_L I_0,$$

где $X_L = \omega L$ – индуктивное сопротивление катушки.

Таким образом запишем закон Ома:

$$I_0 = \frac{U_0}{\omega L}.$$

График: представим U в виде: $U_L = U_0 \sin(\omega t + \pi/2)$, тогда:

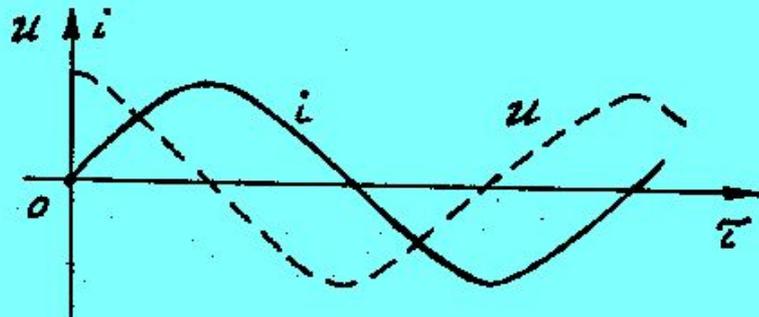


Рис. 20.9.

Векторная диаграмма:

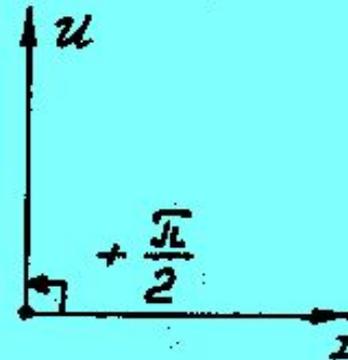


Рис. 20.10.

Вывод: напряжение опережает ток на 90° .

Емкость в цепи переменного тока.

Емкостью называется элемент, который преобразует энергию источника электрического тока в энергию электрического поля конденсатора.

Схема:

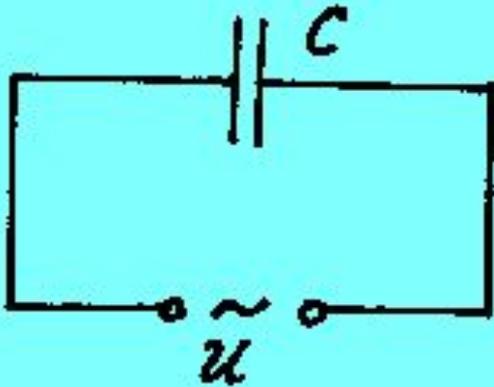


Рис. 20.11.

По определению

$$C = \frac{q}{U_c}, \quad i = \frac{dq}{dt} \Rightarrow q = \int_0^t i dt$$

$$U_c = \frac{1}{C} q = \frac{1}{C} \int_0^t i dt, \quad \text{т. к. } i = I_0 \cos \omega t, \quad \text{то}$$

$$U_c = \frac{1}{C} \int_0^t I_0 \cos \omega t dt = \frac{I_0}{\omega C} \sin \omega t = U_0 \sin \omega t,$$

где $U_0 = \frac{I_0}{\omega C}$ — амплитудное значение напряжения.

Далее: $U_0 = \frac{1}{\omega C} I_0 = X_c I_0$, где X_c — емкостное реактивное сопротивление конденсатора.

Таким образом запишем закон Ома:

$$I_0 = \frac{U_0}{\frac{1}{\omega C}}.$$

График:

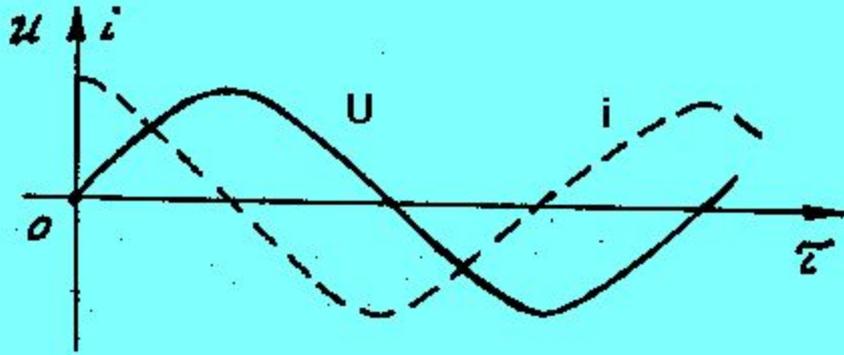


Рис. 20.12.

Векторная диаграмма:

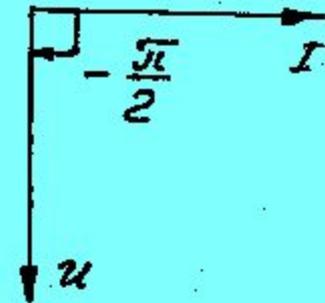


Рис. 20.13.

Вывод: в цепи с емкостной нагрузкой напряжение отстает от тока на 90° .

Последовательное соединение активного сопротивления, индуктивности и емкости в цепи переменного тока

Схема:

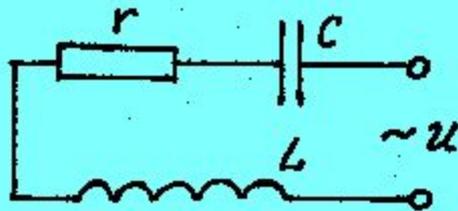


Рис. 20.14.

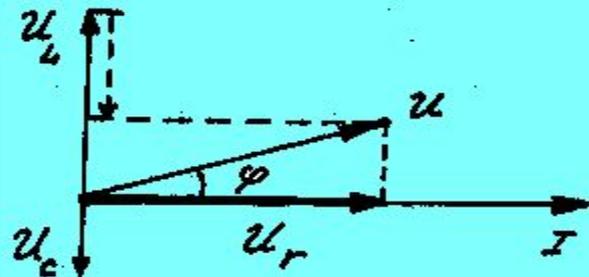


Рис. 20.15

$$I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{r^2 + (X_L - X_C)^2}}$$

Запишем второй закон Кирхгофа для этой цепи. Результирующее напряжение равно:

$$U = U_r + U_L + U_C$$

Ток $i = i_r = i_L = i_C$. Опорный вектор – ток.

Из векторной диаграммы следует:

$$U^2 = U_r^2 + (U_L + U_C)^2 \text{ или}$$

$$(IR)^2 = (Ir)^2 + I^2 (X_L - X_C)^2$$

$$R^2 = r^2 + (X_L - X_C)^2 = Z^2, \text{ тогда}$$

закон Ома для цепи переменного тока, содержащей активное сопротивление, индуктивность и емкость.

20.3. Резонанс в последовательной и параллельной цепи

Рассмотрим схему последовательного соединения активного сопротивления, индуктивности и емкости в цепи переменного тока (рис. 20.14).

Определим угол сдвига фаз:
$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{U_L - U_C}{U_r} = \frac{X_L - X_C}{r}.$$

1. $X_L > X_C$ – в цепи преобладает индуктивная нагрузка ($\varphi > 0$); напряжение опережает ток по фазе.
2. $X_L < X_C$ – в цепи преобладает емкостная нагрузка ($\varphi < 0$); напряжение отстает от тока по фазе.
3. $X_L = X_C$ – емкостная и индуктивная нагрузки равны ($\varphi = 0$); напряжение совпадает с током по фазе. При этом из закона Ома следует, что ток в цепи будет максимальным (резонанс напряжений).

Условия резонанса напряжений:

$$X_L = X_C \Rightarrow \omega L = \frac{1}{\omega C} \Rightarrow \omega^2 = \frac{1}{LC} \Rightarrow \omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Резонанс можно достичь двумя способами:

1. Параметрический резонанс (меняются значения L и C).
2. Частотный резонанс (меняется частота колебаний):

$$2\pi f = \frac{1}{\sqrt{LC}} \Rightarrow f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{или} \quad T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Параллельный резонанс

Схема:

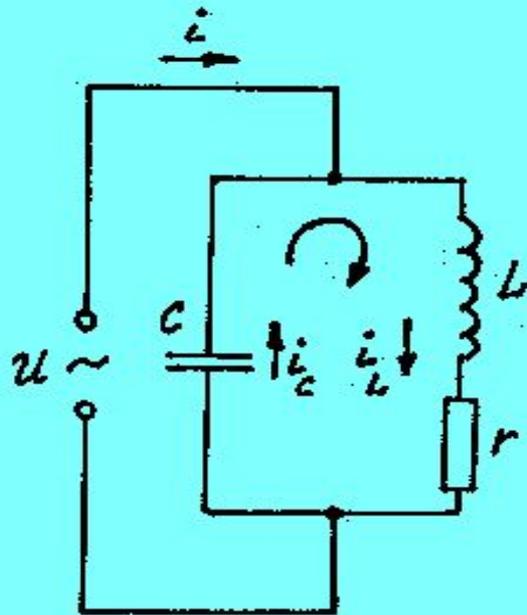


Рис. 20.16.

Векторная диаграмма:

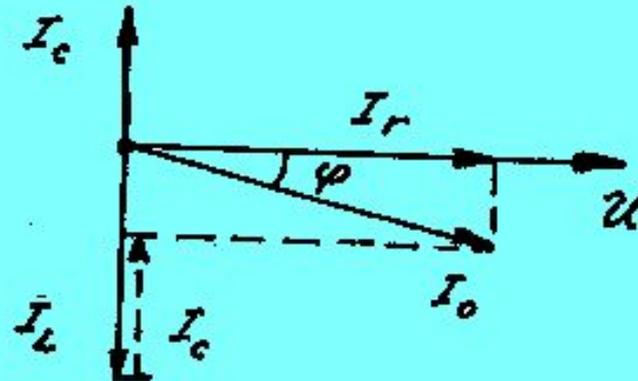


Рис. 20.17.

Запишем второй закон Кирхгофа для этой цепи.

Ток в неразветвленной части цепи равен:

$$i = i_c + I_{L,r}$$

Напряжение:

$$U_c = U_L + U_r$$

Опорный вектор –
напряжение.

Из векторной диаграммы
видно:

$$i = \sqrt{i_r^2 + (i_L + i_C)^2} \quad \text{или}$$

$$bU = \sqrt{(b_r U)^2 + ((b_L U) - (b_C U))^2} \quad |:U$$

$$b = \sqrt{b_r^2 + (b_L - b_C)^2},$$

где b, b_r, b_L, b_C – проводимости.

$$I_0 = \sqrt{b_r^2 + (b_L - b_C)^2} \cdot U_0 \quad \begin{array}{l} \text{закон Ома для параллельной цепи,} \\ \text{— содержащей сопротивление,} \\ \text{индуктивность и емкость.} \end{array}$$

Определим угол сдвига
фаз:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{b_L - b_C}{b_r}.$$

1. $b_L > b_C$ – проводимость индуктивной ветви больше проводимости емкостной ($\phi < 0$). Напряжение опережает ток по фазе.
2. $b_L < b_C$ – проводимость индуктивной ветви меньше проводимости емкостной ($\phi > 0$). Напряжение отстает от тока по фазе.
3. $b_L = b_C$ – проводимости равны. ($\phi = 0$). Напряжение совпадает с током по фазе. При этом из закона Ома следует, что ток в цепи будет минимальным (резонанс токов).

Условие резонанса токов:

$$b_L = b_C \Rightarrow \omega C = \frac{1}{\omega L} \Rightarrow \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{или} \quad f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

20.4. Проблема передачи электроэнергии на расстояние, трансформатор.

Для передачи электроэнергии на большие расстояния от источника к потребителю служат линии электропередач (ЛЭП). При этом приходится решать ряд научно - технических задач, одна из которых состоит в уменьшении потерь электроэнергии при ее передаче к потребителю. Эта задача решается путем трансформации напряжения. Трансформация напряжения заключается в изменении величины передаваемого напряжения без существенного изменения мощности электрического тока. Для этой цели служит устройство, называемое трансформатором.

В основе работы трансформатора лежит явление электромагнитной индукции. Простейший трансформатор состоит из сердечника и двух намотанных на него обмоток (катушек) – первичной и вторичной (рис. 20.18). Сердечник, в свою очередь состоит из тонких плотно склеенных между собой листов электротехнической стали и служит для передачи магнитного потока от первичной катушки ко вторичной. Электротехническая сталь обладает способностью к быстрому перемагничиванию без насыщения и называется магнитомягкой.

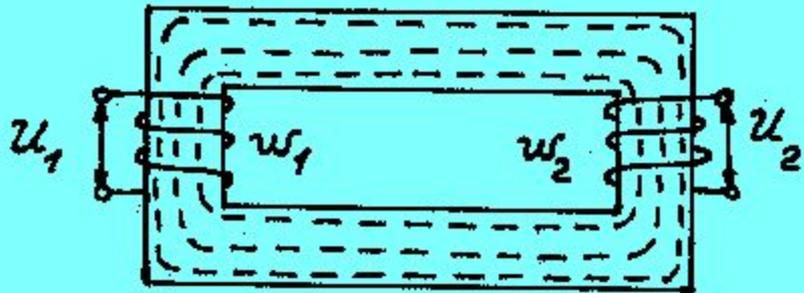


Рис. 20.18.

Согласно закону электромагнитной индукции Фарадея ЭДС индукции E_1 и E_2 , создаваемые в первичной и вторичной катушках выражаются формулами

$$\begin{cases} E_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} \\ E_2 = -w_2 \frac{d\Phi'}{dt} \end{cases}$$

где w_1 и w_2 – число витков в первичной и вторичной катушках трансформатора соответственно.

По второму правилу Кирхгофа напряжения на первичной и вторичной обмотках

$$\begin{cases} U_1 = |E_1| \\ U_2 = |E_2| \end{cases}$$

Тогда получим

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} = K_{12} \quad \text{— коэффициент трансформации}$$

В зависимости от величины K_{12} различают повышающие и понижающие трансформаторы. Например, при передаче электроэнергии от электростанции в ЛЭП используются повышающие трансформаторы и напряжения в ЛЭП составляют тысячи и миллионы вольт (отсюда и названия ЛЭП – 500 и т. д.). Наоборот, т. к. бытовые приборы (потребители электроэнергии) рассчитаны на низкое напряжение (~220 В) необходимо последовательно понизить высокое напряжение в ЛЭП через сеть распределительных подстанций районного и местного значения до напряжения, используемого потребителями электроэнергии.

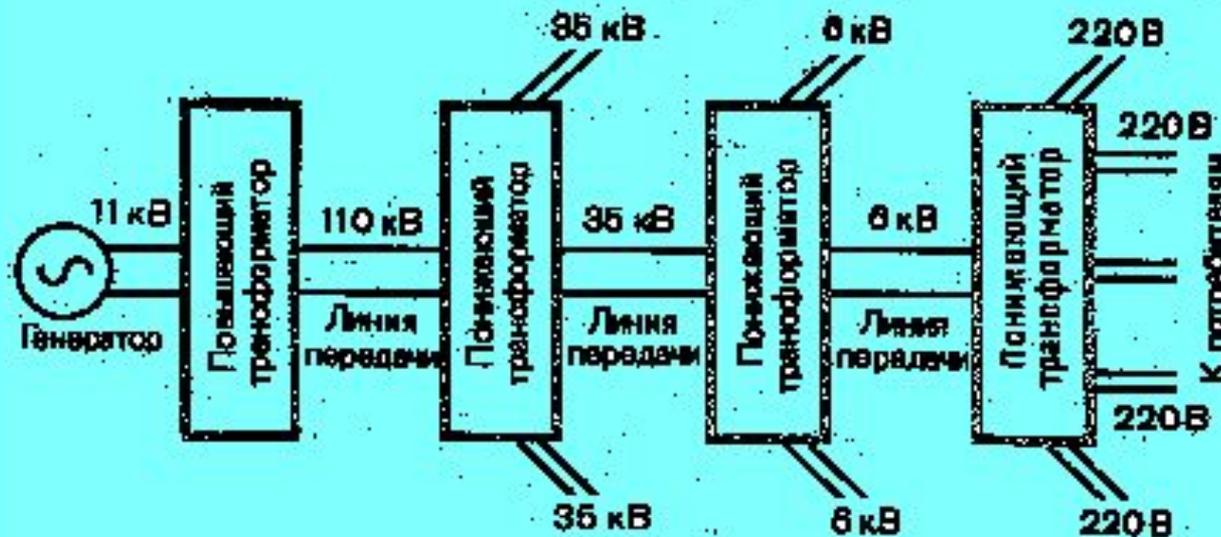


Рис. 20.19.