Лекция 25
Квазистационарные токи

Вопросы. *Квазистационарный ток. Получение переменной ЭДС. Активное сопротивление в цепи переменного тока Действующее и среднее значение переменного тока.*

25.1. Получение переменной ЭДС

На практике обычно имеют дело с непостоянным током, т. е. с током, который изменяется с течением времени. Все электромагнитные возбуждения передаются по цепи с большой скоростью, равной скорости света в вакууме c. Если длина цепи l, то время, необходимое для того, чтобы возбуждение дошло до самой отдаленной точки цепи, равно $\tau = \frac{l}{c}$. Если за это время сила тока изменяется незначительно, то ее мгновенные значения во всех сечениях проводников цепи практически одинаковы. Такие токи называют *квазистационарными*. Мгновенные значения квазистационарных токов подчиняются закону Ома и правилам Кирхгофа.

Для периодически изменяющихся токов с периодом T условием квазистационарности является:

$$\tau = \frac{l}{c} \ll T. \qquad (25.1)$$

Примером такого тока является переменный ток.

Переменным называется ток, сила, направление и напряжение которого периодически изменяются на противоположные. Такой ток представляет собой вынужденные электромагнитные колебания в электрической цепи под воздействием периодической внешней ЭДС. *Периодом* переменного тока называется наименьший промежуток времени, на протяжении которого напряжение и сила тока выполняют одно полное колебание. *Частотой* переменного тока называется количество периодов переменного тока за секунду.

Если ЭДС изменяется с течением времени по гармоническому закону, переменный ток называют *синусоидальным*. Получение синусоидального переменного тока основано на законе электромагнитной индукции. Представим рамку площадью S, которая равномерно вращается в однородном магнитном поле с индукцией B вокруг оси, расположенной в плоскости рамки и перпендикулярной вектору индукции магнитного поля, с угловой скоростью ω. Мгновенное значение ЭДС индукции, возникающей в рамке, равно

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Поскольку

$$\Phi = BS\cos\alpha\,,$$

где $\alpha = \omega t$ – угол между направлением поля и нормалью к рамке (рис. 25.1), то

$$\mathcal{E}_i = -\left(BS\cos\omega t\right)' = BS\omega\sin\omega t\,. \qquad (25.2)$$

Обозначив через $\mathcal{E}_0 = BS\omega$ максимальное значение ЭДС индукции получим,

$$\mathcal{E}_i = \mathcal{E}_0\sin\omega t\,. \qquad (25.3)$$

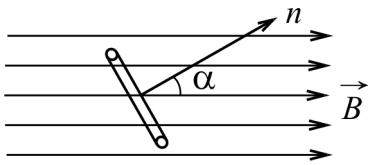

Рис. 25.1

Таким образом, ЭДС индукции изменяется с течением времени по гармоническому закону. Рамка, которая вращается в магнитном поле, представляет собой простейший генератор переменного тока. Промышленный генератор состоит из трех основных частей: индуктора, якоря и коллектора. *Индуктором* является постоянный магнит или электромагнит, который создает магнитное поле. *Якорь* – это обмотка, в которой индуцируется ЭДС. *Коллектор* представляет собой устройство, с помощью которого ЭДС снимается с якоря и подается потребителю. В простейшем случае коллектор – это два кольца и скользящие контакты – щетки (рис. 25.2), с помощью которых осуществляется постоянное соединение с вращающейся обмоткой.

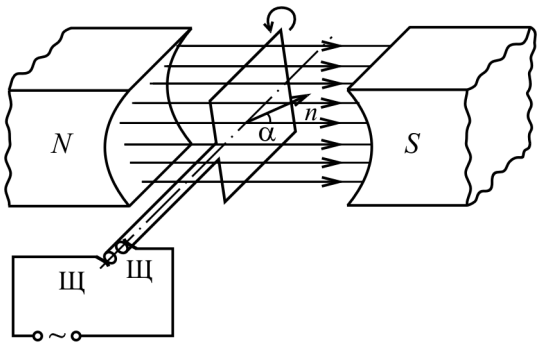

Рис. 25.2

Неподвижная часть генератора называется *статором*, а подвижная – *ротором*. В маломощных генераторах статором является индуктор, а ротором – якорь; в мощных – наоборот.

Если к генератору подключить внешнюю электрическую цепь, сопротивление которой значительно больше, чем сопротивление обмотки якоря, то напряжение на зажимах этой цепи будет практически равным ЭДС индукции, которая возникает в якоре. Поэтому $\mathcal{E}_i = U$, а согласно выражению (25.3)

$$U = U_0\sin\omega t\,, \qquad (25.4)$$

Изменение напряжения с частотой ω приводит к тому, что напряженность поля в цепи, а значит и сила тока в ней также изменяются с той же частотой:

$$I = I_0\sin(\omega t + \varphi)\,, \qquad (25.5)$$

где φ – сдвиг фаз между током и напряжением в цепи (он зависит от того, какие элементы входят в состав цепи); I_0 – максимальное значение силы тока в цепи.

25.2. Активное сопротивление в цепи переменного тока

Рассмотрим цепь переменного тока (рис. 25.3), которая содержит только резистор сопротивлением R.

Такая цепь называется цепью переменного тока с *активным сопротивлением*. При синусоидальном переменном напряжении на зажимах цепи $U = U_0 \sin \omega t$ ток в ней будет синусоидальным, потому что по закону Ома

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U_0 \sin \omega t}{R} = I_0 \sin \omega t . \qquad (25.6)$$

Таким образом, в цепи переменного тока с активным сопротивлением колебания силы тока совпадают по фазе с колебаниями напряжения (рис. 25.4), а амплитудное значение силы тока определяется по формуле

$$I_0 = \frac{U_0}{R} . \qquad (25.7)$$

В такой цепи имеет место только превращение работы тока во внутреннюю энергию проводника.

Тепловое действие в цепи, содержащей R, вызывает и постоянный ток. Поэтому, сравнивая количество теплоты, выделяемое на резисторе R за определенное время, переменным током и постоянным током вводят понятие действующего значения переменного тока.

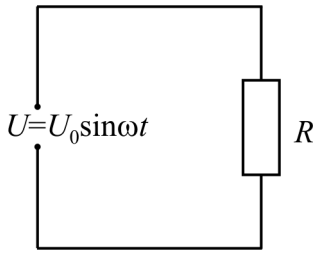

Рис. 25.3

Действующимм значением ($I_{ä}$) переменного тока называется значение переменного тока, который, проходя через сопротивление, выделяет такое же количество теплоты, что и проходящий через это же сопротивление постоянный ток за одинаковое время. Так, согласно закону Джоуля–Ленца при постоянном токе I и равном ему действующем значении переменного тока $I_{ä}$ в некотором активном сопротивлении R за время, равное периоду переменного тока T выделяется количество теплоты

$$Q = I^2 RT = I_{ä}^2 RT . \qquad (25.8)$$

При переменном токе за то же время, равное периоду, выделится количество теплоты

$$Q = \int_0^T \left(I_0^2 R \sin^2 \omega t \right) dt . \qquad (25.9)$$

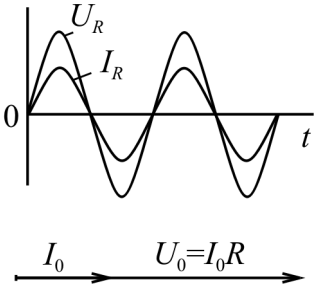

Рис. 25.4

Приравняв правые части выражений (25.8)и (25.9), получим:

$$I_{ä}^2 = \frac{1}{T}\int_0^T \left(I_0^2 \sin^2 \omega t\right) dt ,$$

или

$$I_{ä} = \sqrt{\frac{I_0^2}{T}\int_0^T \left(\sin^2 \omega t\right) dt} . \qquad (25.10)$$

Если учесть тригонометрическую тождественность

$$\sin^2 \omega t = \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \qquad (25.11)$$

и то, что среднее значение косинуса за период равно нулю, получим:

$$\int_0^T \left(\sin^2 \omega t\right) dt = \frac{T}{2} . \qquad (25.12)$$

Тогда выражение (25.10) для действующего значения переменного тока равно:

$$I_{ä} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} , \qquad (25.13)$$

а действующее значение напряжения

$$U_{ä} = \frac{U_0}{\sqrt{2}} . \qquad (25.14)$$

Действующие значения переменного тока и напряжения регистрируют стрелочные электроизмерительные приборы: амперметры и вольтметры.

Иногда пользуются средними значениями переменного тока и напряжения, которые расчитывают за половину периода, так как за время, равное периоду, их значения равны нулю.

Если ток в цепи изменяется по закону $I = I_0 \sin \omega t$, то его среднее значение $I_{ñð}$ равно:

$$I_{ñð} = \frac{1}{T/2}\int_0^{\frac{T}{2}} I dt = \frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} I_0 \sin \omega t dt = -\frac{2I_0}{T\omega}\left(\cos\frac{2\pi}{T}\frac{T}{2} - \cos 0\right) = \frac{2I_0}{\pi} . \qquad (25.15)$$

Тогда среднее значение напряжения:

$$U_{ñð} = \frac{2U_0}{\pi} . \qquad (25.16)$$