

Урок №13 (6.12.2018)

Постоянный ток. Микроскопическая картина тора. Работа и мощность электрического тока.

1. Плотность электрического тока

В первом приближении электроны ведут себя в проводнике как электронный газ, заполняющий пространство между ионами кристаллической решётки. Вылететь за пределы кристаллической решётки в обычных случаях электроны не могут, т.к. для этого требуется преодолеть потенциальный барьер (*работа выхода*).

Средняя скорость хаотического движения электронов в металле (в классическом случае) равна $\tilde{v}_e \sim 10^5$ м/с.

Если есть внешнее электрическое поле, возникает дрейф электронов. Среднюю дрейфовую скорость легко посчитать, учитывая, что концентрация электронов проводимости n близка к концентрации атомов в металле, которая равна $10^{28} - 10^{29}$ м⁻³, а за время Δt через сечение проводника проходит заряд $\Delta q = enS\tilde{v}_d \cdot \Delta t$, где \tilde{v}_d – средняя дрейфовая скорость электронов. Учитывая определение электрического тока $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$, получим $\tilde{v}_d = \frac{I}{enS}$. Для тока 1 А и провода сечением 1 мм² получим $\tilde{v}_d \sim 1$ мм/с; $\tilde{v}_d \ll \tilde{v}_e$.

Почему заряды движутся в проводнике без ускорения?

Плотность электрического тока \vec{j} – это сила тока, приходящаяся на единицу площади поперечного сечения в данной точке пространства.

Из полученного выше выражения для \tilde{v}_d следует, что плотность тока равна

$$j = \frac{I}{S} = -ne\tilde{v}_d.$$

Учитывая, что $R = \rho \frac{L}{S}$, $I = jS$ и $V = EL$, и подставляя все это в закон Ома, по-

лучим: $EL = (jS) \left(\rho \frac{L}{S} \right) = j\rho L$, откуда $j = \frac{1}{\rho} E = \sigma E$ – закон Ома в дифференциальной форме.

2. Работа и мощность тока

При перемещении заряда q силы электрического тока совершают работу $A = qU$. Учитывая, что для постоянного тока $q = It$, получаем $A = UI t$.

Вспомним, что мощность определяется как $P = \frac{A}{\Delta t}$, следовательно $P = UI$.

Мощность измеряется в ваттах: 1 Вт = 1 Дж/с = 1 А · 1 В.

Дома мы платим за потребление энергии, т.е. за работу, совершенную электрическим током, а не за мощность, поэтому счётчик у нас считает киловатт-часы.

3. Закон Джоуля-Ленца

При прохождении сопротивления электрический ток совершает работу, которая идёт на нагревание сопротивления. Для однородного участка работа тока равна

$$A = IUt = I^2 R t \left(= \frac{U^2}{R} t \right).$$

Закон Джоуля-Ленца утверждает, что на любом участке, имеющем сопротивление R , за время t выделяется количество теплоты, равное $Q = I^2 R t$.

4. Согласование сопротивлений. КПД источника

Пусть у нас внутреннее сопротивление источника r , его ЭДС – ε , сопротивление внешней цепи R . Из закона Ома, полный ток в цепи будет $I = \varepsilon / (R + r)$, поэтому полная мощность, развиваемая источником тока, будет $P = \varepsilon I = \varepsilon^2 / (R + r)$.

Определим полезную мощность, как мощность, выделяющуюся на нагрузке:

$$P_{II} = IU = I^2 R = \frac{\varepsilon^2 R}{(R + r)^2}.$$

Очевидно, коэффициент полезного действия η источника в этой цепи равен

$$\eta = \frac{P_{II}}{P} = \frac{R}{R + r}.$$

Попробуем найти сопротивление нагрузки R , при котором на нем выделяется максимальная мощность.

$$P_{II} = \frac{\varepsilon^2}{(R + r)^2 / R} = \frac{\varepsilon^2}{R + 2r + r^2 / R}.$$

Полезная мощность будет максимальна, когда знаменатель будет минимален:

$$R + 2r + \frac{r^2}{R} = R - 2r + \frac{r^2}{R} + 4r = \left(\sqrt{R} - \frac{r}{\sqrt{R}} \right)^2 + 4r,$$

что, очевидно, будет минимальным, при равенстве нулю значения в скобках, т.е. при $R = r$.

При увеличении нагрузки ($R \rightarrow \infty$) КПД стремится к 100%, но при этом как полезная, так и полная мощность стремятся к нулю.

