В проводах, по которым идут токи высокой частоты, также возникают вихревые токи, существенно меняющие картину распределения плотности тока на различных расстояниях от оси проводника. При этом вихревые токи текут по оси проводника против направления основного тока, на поверхности его — в том же направлении. Таким образом, результирующий ток по оси проводника ослабляется, а на поверхности — усиливается. Чем больше частота тока, тем меньше толщина поверхностного слоя, в котором текут заметные токи. Это явление получило название скин-эффекта (от английского слова skin — кожа, кожура). В силу скин-эффекта проводники в высокочастотных схемах не имеет смысла делать сплошными. Для уменьшения сопротивления нужно увеличивать их поверхность, а не сечение, т. е. изготовлять проводники в виде трубок. В электропечах этим обстоятельством пользуются, охлаждая трубки катушки, по которым идет ток высокой частоты, с помощью воды, циркулирующей внутри трубок.

В. П. Вологдин использовал токи высокой частоты для поверхностной закалки деталей машин. В мощном переменном поле поверхностные слои металла разогреваются очень быстро, но основная масса металла остается холодной Затем производится быстрое охлаждение разогретой поверхности металла (погружением в воду или в масло). Закаленная таким способом деталь имеет твердую поверхность, но не становится хрупкой, так как металл под тонким поверхностным слоем сохраняет свою вязкость. Достигнуть таких результатов с помощью обычной закалки трудно. Меняя частоту поля, можно производить закалку на любую необходимую глубину. Этот метод закалки деталей ныне широко применяется в промышленности.

§ 45. Энергия магнитного поля

Рассмотрим произвольный контур с индуктивностью L. В отсутствие тока в окружающем пространстве нет магнитного поля, и магнитный поток, сцепленный с контуром, равен нулю. Когда через контур течет ток i, то с контуром сцеплен магнитный поток

$$\Phi = k'Li. \tag{45.1}$$

При изменении тока на di магнитный поток меняется на величину

$$d\Phi = k'L\,di. \tag{45.2}$$

Как было показано в § 35, для изменения магнитного потока на $d\Phi$ необходимо совершить работу

$$dA = k'i\,d\Phi. \tag{45.3}$$

Эта работа идет на увеличение запаса энергии W контура с током

и при уменьшении тока может быть получена обратно и преобразована в другие формы энергии, например в механическую. Таким образом, при возрастании тока в контуре на di энергия контура увеличивается на

$$dW = k'i\,d\Phi = k'^2 Li\,di. \tag{45.4}$$

В отсутствие тока ($i=0$) его энергия равна нулю. При увеличении тока до некоторого окончательного значения I энергия контура с током становится равной

$$W = \int_0^W dW = k'^2 \int_0^I Li\,di = k'^2 \frac{LI^2}{2}.$$

Таким образом, контур с током I обладает запасом энергии

$$W = k'^2 \frac{LI^2}{2}. \tag{45.5}$$

Следовательно, в СИ $W = {}^1/_2\, LI^2$, где W выражено в *дж*, L — в *гн*, I — в *а*; в гауссовой системе $W = \frac{LI^2}{2c^2}$, где W выражено в *эрг*, L — в *см*, а I — в СГС ед. тока $= \frac{10}{c}$ *а*.

Выражение (45.5) очень напоминает выражение для кинетической энергии движущегося тела $\frac{mv^2}{2}$. Роль скорости v в (45.5) играет ток I, характеризующий интенсивность движения электрических зарядов, а роль массы играет индуктивность контура L. Как уже указывалось выше, L характеризует электромагнитную инерцию контура, так же как масса m характеризует механическую инерцию тела.

Возникает вопрос о том, где локализована энергия W. Эта энергия остается постоянной, если не меняется ток в контуре, однако ее нельзя непосредственно сопоставить с кинетической энергией движения электронов в контуре: контур с другой индуктивностью при том же токе будет обладать другой энергией. Единственная возможность — это приписать энергию W магнитному полю, связанному с током.

Энергия dW элемента объема поля dV равна

$$dW = W_0(B)\,dV,$$

где $W_0(B)$ — плотность энергии магнитного поля, т. е. энергия единицы объема магнитного поля B. Для вычисления последней рассмотрим простейший случай, когда поле контура однородно.

Таким будет поле замкнутого соленоида, показанного на рис. 3.77. (При большой длине и малом сечении тора его поле почти не отличается от поля внутри длинной прямой катушки.) Согласно (44.2) индуктивность этого соленоида равна

$$L = 4\pi\mu_0\mu \frac{k}{k'} \frac{w^2 S}{l}, \tag{45.6}$$

где w — число витков соленоида, l — его длина (в данном случае — длина центральной окружности тора).

Напряженность H магнитного поля соленоида, согласно (33.15), равна

$$H = k4\pi \frac{wI}{l}. \tag{45.7}$$

Отсюда

$$I = \frac{Hl}{k \cdot 4\pi w}. \tag{45.8}$$

Подставляя эти значения L и I в выражение для W (45.5), находим

$$W = k'^2 \frac{LI^2}{2} = \frac{1}{2} kk'^2 4\pi\mu_0\mu \frac{w^2 S}{l} \frac{H^2 l^2}{(k4\pi w)^2} = \frac{1}{2} \mu_0\mu \frac{k'}{k} SlH^2. \tag{45.9}$$

Но $Sl = V$ есть объем соленоида. Так как поле в нем однородно, то из (45.9) следует, что плотность энергии $W_0 = W/Sl$, т. е.

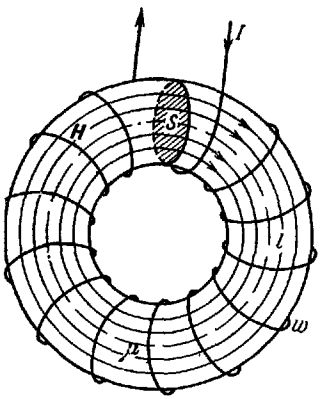

Рис. 3.77.

$$W_0 = \frac{\mu_0\mu k'}{8\pi k} H^2. \tag{45.10}$$

В системе СГС H измеряется в эрстедах, $k = k'$ и $\mu_0 = 1$,

$$W_0 = \frac{\mu H^2}{8\pi} \frac{эрг}{см^3}. \tag{45.11}$$

В системе СИ H измеряется в $а/м$, $k = \frac{1}{4\pi}$, $k' = 1$,

$$W_{0,\,магн} = \frac{\mu_0\mu H^2}{2} \frac{дж}{м^3}. \tag{45.12}$$

Формула (45.10) выведена нами для однородного поля, но остается справедливой и для неоднородных полей. *Объемная плотность энергии магнитного поля прямо пропорциональна квадрату напряженности магнитного поля в данном месте пространства.*

В электростатике нами была выведена аналогичная формула (13.2) для объемной плотности энергии электрического поля

$$W_{0,\ эл} = \frac{\varepsilon E^2}{8\pi} \frac{эрг}{см^3}, \tag{45.13}$$

где E измерялась в СГС-ед. напряженности поля. В тех же единицах при наличии в пространстве и электрического и магнитного полей объемная плотность энергии электромагнитного поля равна

$$W_{0,\ эл.\text{-}магн} = \frac{\varepsilon E^2 + \mu H^2}{8\pi} \frac{эрг}{см^3}, \tag{45.14}$$

или, учитывая, что $\varepsilon E = D$ и $\mu H = B$:

$$W_{0,\ эл\text{-}магн} = \frac{ED + BH}{8\pi}. \tag{45.15}$$