

## Тема: Самоиндукция. Энергия магнитного поля

**Самоиндукция** является важным частным случаем электромагнитной индукции, когда изменяющийся магнитный поток, вызывающий ЭДС индукции, создается током в самом контуре. Если ток в рассматриваемом контуре по каким-то причинам изменяется, то изменяется и магнитное поле этого тока, а, следовательно, и собственный магнитный поток, пронизывающий контур. В контуре возникает ЭДС самоиндукции, которая согласно правилу Ленца препятствует изменению тока в контуре.

Собственный **магнитный поток  $\Phi$** , пронизывающий контур или катушку с током, пропорционален силе тока  $I$ :

$$\Phi = LI.$$

**Коэффициент пропорциональности  $L$**  в этой формуле называется коэффициентом самоиндукции или индуктивностью катушки. Единица индуктивности в СИ называется генри (Гн). Индуктивность контура или катушки равна 1 Гн, если при силе постоянного тока 1 А собственный поток равен 1 Вб:

$$1 \text{ Гн} = 1 \text{ Вб} / 1 \text{ А}.$$

В качестве примера рассчитаем индуктивность длинного соленоида, имеющего  $N$  витков, площадь сечения  $S$  и длину  $l$ . Магнитное поле соленоида определяется формулой

$$B = \mu_0 I n,$$

где  $I$  – ток в соленоиде,  $n = N / l$  – число витков на единицу длины соленоида.

Магнитный поток, пронизывающий все  $N$  витков соленоида, равен

$$\Phi = B S N = \mu_0 n^2 S l L.$$

Следовательно, индуктивность соленоида равна

$$L = \mu_0 n^2 S l = \mu_0 n^2 V,$$

где  $V = Sl$  – объем соленоида, в котором сосредоточено магнитное поле. Полученный результат не учитывает краевых эффектов, поэтому он приближенно справедлив только для достаточно длинных катушек. Если соленоид заполнен веществом с магнитной проницаемостью  $\mu$ , то при заданном токе  $I$  индукция магнитного поля возрастает по модулю в  $\mu$  раз; поэтому индуктивность катушки с сердечником также увеличивается в  $\mu$  раз:

$$L_\mu = \mu L = \mu_0 \mu n^2 V.$$

ЭДС самоиндукции, возникающая в катушке с постоянным значением индуктивности, согласно закона Фарадея равна

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = \mathcal{E}_L = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

ЭДС самоиндукции прямо пропорциональна индуктивности катушки и скорости изменения силы тока в ней.

Магнитное поле обладает энергией. Подобно тому, как в заряженном конденсаторе имеется запас электрической энергии, в катушке, по виткам которой протекает ток, имеется запас магнитной энергии. Если включить электрическую лампу параллельно катушке с большой индуктивностью в электрическую цепь постоянного тока, то при размыкании ключа наблюдается кратковременная вспышка лампы (рис. 1). Ток в цепи возникает под действием ЭДС самоиндукции.

Источником энергии, выделяющейся при этом в электрической цепи, является магнитное поле катушки.

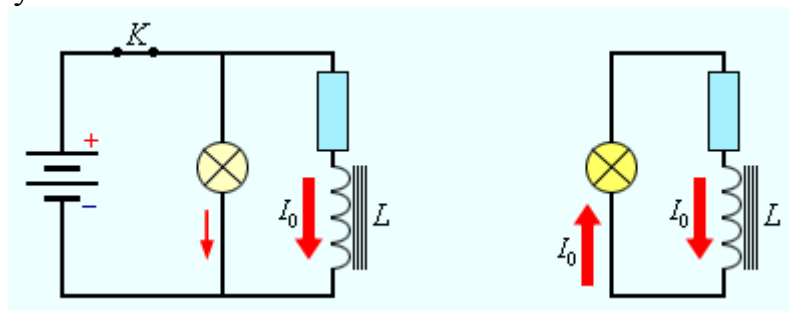


Рисунок 1. Магнитная энергия катушки. При размыкании ключа К лампа ярко вспыхивает

Из закона сохранения энергии следует, что вся энергия, запасенная в катушке, выделится в виде джоулева тепла. Если обозначить через  $R$  полное сопротивление цепи, то за время  $\Delta t$  выделится количество теплоты  $\Delta Q = I^2 R \Delta t$ .

Ток в цепи равен

$$I = \frac{\mathcal{E}_L}{R} = -\frac{L}{R} \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Выражение для  $\Delta Q$  можно записать в виде

$$\Delta Q = -L I \Delta I = -\Phi(I) \Delta I$$

В этом выражении  $\Delta I < 0$ ; ток в цепи постепенно убывает от первоначального значения  $I_0$  до нуля. Полное количество теплоты, выделившейся в цепи, можно получить, выполнив операцию интегрирования в пределах от  $I_0$  до 0. Это дает

$$Q = \frac{LI_0^2}{2}.$$

Эту формулу можно получить графическим методом, изобразив на графике зависимость магнитного потока  $\Phi(I)$  от тока  $I$  (рис. 2). Полное количество выделившейся теплоты, равное первоначальному запасу энергии магнитного поля, определяется площадью изображенного на рис. 2 треугольника.

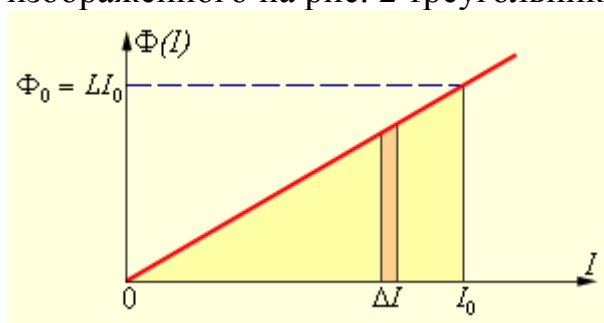


Рисунок 2. Вычисление энергии магнитного поля

Таким образом, энергия  $W_m$  магнитного поля катушки с индуктивностью  $L$ , создаваемого током  $I$ , равна

$$W_m = \frac{\Phi I}{2} = \frac{LI^2}{2} = \frac{\Phi^2}{2L}.$$

Применим полученное выражение для энергии катушки к длинному соленоиду с магнитным сердечником. Используя приведенные выше формулы для

коэффициента самоиндукции  $L$  соленоида и для магнитного поля  $B$ , создаваемого током  $I$ , можно получить:

$$W_{\text{м}} = \frac{\mu_0 \mu n^2 I^2}{2} V = \frac{B^2}{2 \mu_0 \mu} V,$$

где  $V$  – объем соленоида. Это выражение показывает, что магнитная энергия локализована не в витках катушки, по которым протекает ток, а рассредоточена по всему объему, в котором создано магнитное поле. Физическая величина

$$w_{\text{м}} = \frac{B^2}{2 \mu_0 \mu},$$

равная энергии магнитного поля в единице объема, называется **объемной плотностью магнитной энергии**. Дж. Максвелл показал, что выражение для объемной плотности магнитной энергии, выведенное здесь для случая длинного соленоида, справедливо для любых магнитных полей.