

§ 33. Явление самоиндукции. Индуктивность. Энергия магнитного поля катушки с током

Фарадей опытным путём установил, что электромагнитная индукция проявляется во всех случаях изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром. Современник Фарадея американский физик Джозеф Генри (1797–1878) независимо от своего английского коллеги открыл некоторые из электромагнитных эффектов. В 1829 г. Генри обнаружил, что ЭДС индукции возникает в неподвижном контуре и в отсутствие изменения внешнего магнитного поля. Каков механизм возникновения ЭДС индукции в этом случае?

Самоиндукция. Если электрический ток, проходящий в замкнутом проводящем контуре, по каким-либо причинам изменяется, то изменяется и магнитное поле, создаваемое этим током. Это влечёт за собой изменение магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром. Поскольку магнитный поток Φ пропорционален модулю магнитной индукции B поля, который, в свою очередь, пропорционален силе тока I в контуре, то

$$\Phi \sim I.$$

Коэффициенту пропорциональности между магнитным потоком Φ и силой тока I Томсон (лорд Кельвин) в 1853 г. предложил название «коэффициент самоиндукции»:

$$\Phi = LI. \quad (33.1)$$

Коэффициент самоиндукции L часто называют *индуктивностью* контура. В СИ индуктивность измеряют в генри (Гн). Индуктивность контура равна 1 Гн, если при силе тока в контуре 1 А магнитный поток через поверхность, ограниченную этим контуром, равен 1 Вб. Индуктивность зависит от размеров и формы контура, а также от магнитных свойств среды, в которой находится этот контур.

Если электрический ток, проходящий в контуре, изменяется, то он создаёт изменяющийся магнитный поток, что приводит к появлению ЭДС индукции. Это явление называли *самоиндукцией*.

Самоиндукция — явление возникновения ЭДС индукции в электрической цепи в результате изменения силы тока в этой же цепи.

Возникающую в этом случае ЭДС называли *электродвижущей силой самоиндукции*. Согласно закону электромагнитной индукции,

$$\mathcal{E}_c = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{\Delta(LI)}{\Delta t}.$$

Если индуктивность контура не изменяется во времени, т. е. $L = \text{const}$, то

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

Поскольку контур замкнут, ЭДС самоиндукции создаёт в нём ток самоиндукции. Силу тока самоиндукции можно определить по закону Ома $I_c = \frac{\mathcal{E}_c}{R}$ где R — сопротивление контура. Согласно правилу Ленца, ток самоиндукции всегда направлен так, чтобы противодействовать изменению тока, создаваемого источником. При возрастании силы тока ток самоиндукции направлен против тока источника, а при уменьшении — направления тока источника и тока самоиндукции совпадают.

От теории к практике

Какой должна быть скорость изменения силы тока, чтобы в катушке с индуктивностью $L = 0,20$ Гн возникла ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_c = 4,0$ В?

Наблюдение самоиндукции. Для наблюдения явления самоиндукции соберём электрическую цепь, состоящую из катушки с большой индуктивностью, резистора с электрическим сопротивлением, равным сопротивлению обмотки катушки, двух одинаковых лампочек, ключа и источника постоянного тока. Схема цепи представлена на рисунке 185. При замыкании ключа лампочка $\mathcal{L}_2$ начинает светиться практически сразу, а лампочка $\mathcal{L}_1$ — с заметным запаздыванием. При возрастании силы тока I_1 , созданного источником на участке, образованном катушкой и лампочкой $\mathcal{L}_1$, ЭДС самоиндукции в катушке имеет такую полярность, что создаваемый ею ток самоиндукции I_c направлен навстречу току источника. В результате рост силы тока I_1 источника замедляется, и сила тока $I_1 - |I_c|$ не сразу достигает своего максимального значения.

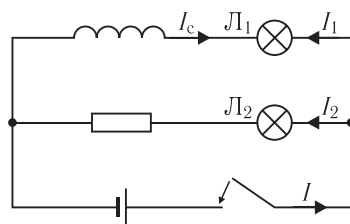


Рис. 185



Энергия магнитного поля. Явление самоиндукции можно наблюдать и при размыкании электрической цепи. Если включить лампочку параллельно катушке

в электрическую цепь постоянного тока, то при размыкании цепи можно увидеть, что лампочка ярко вспыхивает. Почему это происходит? При размыкании цепи сила тока в катушке убывает, что приводит к возникновению ЭДС самоиндукции. Возникающий в цепи ток самоиндукции, согласно правилу Ленца, совпадает по направлению с током катушки, не позволяя ему резко уменьшать силу тока. Это и обеспечивает вспышку лампочки.

Откуда берётся энергия, обеспечивающая вспышку лампочки? Это не энергия источника тока, так как он уже отсоединён. Вспышка лампочки происходит одновременно с уменьшением силы тока в катушке и создаваемого током магнитного поля. Можно предположить, что запасённая в катушке в процессе самоиндукции энергия магнитного поля превращается во внутреннюю энергию спирали лампочки и энергию её излучения.



Расчёты подтверждают, что энергию магнитного поля можно определить по формуле

$$W_M = \frac{LI^2}{2},$$

где L — индуктивность контура; I — сила тока.

От теории к практике

Какова индуктивность катушки, если при силе тока $I = 2,0$ А энергия магнитного поля катушки $W_M = 1,2$ Дж?



Самоиндукция — явление возникновения ЭДС индукции в электрической цепи в результате изменения силы тока в этой же цепи

ЭДС самоиндукции прямо пропорциональна индуктивности контура (катушки) и скорости изменения силы тока в нём:

$$\mathcal{E}_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Явление самоиндукции происходит при изменении силы тока в цепи, содержащей индуктивность

Энергия магнитного поля катушки с током пропорциональна квадрату силы тока:

$$W_M = \frac{LI^2}{2}$$



1. Что называют самоиндукцией?
2. В каких опытах можно наблюдать явление самоиндукции?
3. От чего зависит ЭДС самоиндукции?
4. Что называют индуктивностью? В каких единицах в СИ её измеряют?
5. Как вычислить энергию магнитного поля катушки с током?



Примеры решения задач

Пример 1. На рисунке 186 представлен график зависимости силы тока, проходящего по соленоиду, от времени. Определите максимальное значение модуля ЭДС самоиндукции в соленоиде, если его индуктивность $L = 40$ мГн.

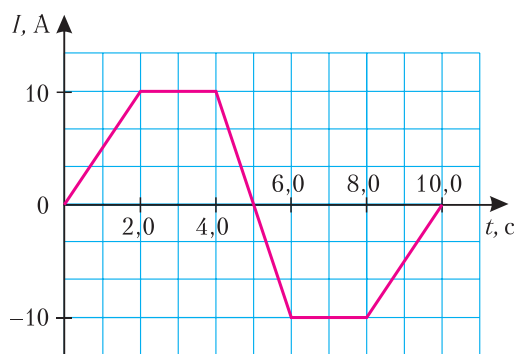


Рис. 186

Дано:

$$L = 40 \text{ мГн} = 4,0 \cdot 10^{-2} \text{ Гн}$$

$$|\mathcal{E}_c|_{\text{max}} \text{ — ?}$$

Решение. ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$.
Анализируя график (рис. 186), можно сделать вывод, что сила тока, проходящего по соленоиду, изменяется на трёх участках:

1) от момента времени $t_1 = 0,0$ с до момента времени $t_2 = 2,0$ с сила тока изменяется на $\Delta I_1 = 10$ А за промежуток времени $\Delta t_1 = 2,0$ с;

2) от момента времени $t_3 = 4,0$ с до момента времени $t_4 = 6,0$ с сила тока изменяется на $\Delta I_2 = -20$ А за промежуток времени $\Delta t_2 = 2,0$ с;

3) от момента времени $t_5 = 8,0$ с до момента времени $t_6 = 10,0$ с сила тока изменяется на $\Delta I_3 = 10$ А за промежуток времени $\Delta t_3 = 2,0$ с.

Поскольку промежутки времени $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_3 = 2,0$ с, то очевидно, что максимальное значение модуля скорости изменения силы тока, а следовательно, и максимальное значение модуля ЭДС самоиндукции, создаваемой

в соленоиде, соответствует промежутку времени $\Delta t_2 = 2,0$ с (от $t_3 = 4,0$ с до $t_4 = 6,0$ с):

$$|\mathcal{E}_c|_{\max} = L \left| \frac{\Delta I_2}{\Delta t_2} \right|.$$

Таким образом,

$$|\mathcal{E}_c|_{\max} = 4,0 \cdot 10^{-2} \text{ Гн} \cdot \frac{|-20 \text{ А}|}{2,0 \text{ с}} = 0,40 \text{ В}.$$

Ответ: $|\mathcal{E}_c|_{\max} = 0,40 \text{ В}.$

Пример 2. На рисунке 187 представлен график зависимости ЭДС самоиндукции, возникающей в катушке с индуктивностью $L = 2,0$ мГн, от времени. Определите изменения силы тока на участках I, II и III графика. Чему равна энергия магнитного поля в момент времени $t = 4,0$ с, если в начальный момент времени сила тока в катушке $I = 0$?

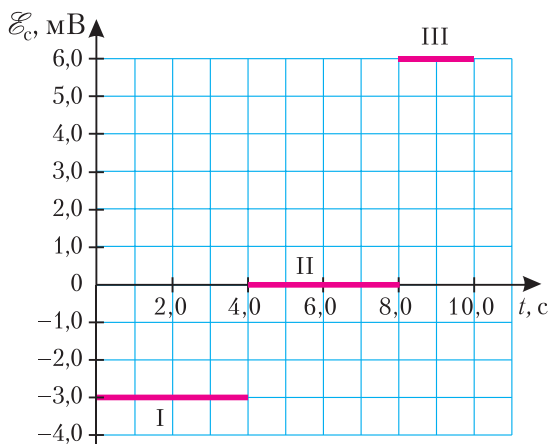


Рис. 187

Дано:

$$\begin{aligned} L &= 2,0 \text{ мГн} = \\ &= 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \\ t &= 4,0 \text{ с} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta I_I &= ? \quad \Delta I_{II} = ? \\ \Delta I_{III} &= ? \quad W_M = ? \end{aligned}$$

Решение. Анализируя график, можно сделать вывод, что на участке I ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_{cI} = -3,0$ мВ, на участке III — $\mathcal{E}_{cIII} = 6,0$ мВ. Изменение силы тока на этих участках графика можно определить, воспользовавшись законом электромагнитной индукции для явления самоиндукции:

$$\mathcal{E}_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}; \Delta I = -\frac{\mathcal{E}_c \Delta t}{L}.$$

$$\Delta I_I = -\frac{-3,0 \cdot 10^{-3} \text{ В} \cdot 4,0 \text{ с}}{2,0 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}} = 6,0 \text{ А}; \Delta I_{III} = -\frac{6,0 \cdot 10^{-3} \text{ В} \cdot 2,0 \text{ с}}{2,0 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}} = -6,0 \text{ А}.$$

На участке II графика $\mathcal{E}_{сII} = 0$, следовательно, сила тока не изменялась: $\Delta I_{II} = 0$.

В момент времени $t = 4,0 \text{ с}$ энергия магнитного поля катушки $W_M = \frac{LI^2}{2}$.

Следовательно, $W_M = \frac{2,0 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \cdot (6,0 \text{ А})^2}{2} = 36 \cdot 10^{-3} \text{ Дж} = 36 \text{ мДж}$.

Ответ: $\Delta I_I = 6,0 \text{ А}$; $\Delta I_{II} = 0$; $\Delta I_{III} = -6,0 \text{ А}$; $W_M = 36 \text{ мДж}$.



Упражнение 24

1. Сила тока, проходящего по замкнутому проводящему контуру, $I = 1,2 \text{ А}$. Магнитное поле этого тока создаёт магнитный поток $\Phi = 3,0 \text{ мВб}$ через поверхность, ограниченную контуром. Определите индуктивность контура.

2. При равномерном изменении силы тока в катушке на $\Delta I = -4,0 \text{ А}$ за промежуток времени $\Delta t = 0,10 \text{ с}$ в ней возникает ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_c = 20 \text{ В}$. Определите индуктивность катушки.

3. Определите ЭДС самоиндукции, возникающую в катушке, индуктивность которой $L = 1,2 \text{ Гн}$, при равномерном изменении силы тока от $I_1 = 2,0 \text{ А}$ до $I_2 = 6,0 \text{ А}$ за промежуток времени $\Delta t = 0,60 \text{ с}$. Определите приращение энергии магнитного поля при заданном изменении силы тока.

4. На рисунке 188 представлен график зависимости силы тока в катушке, индуктивность которой $L = 10 \text{ мГн}$, от времени. Определите ЭДС самоиндукции через промежутки времени $t_1 = 10 \text{ с}$ и $t_2 = 20 \text{ с}$ от момента начала отсчёта времени.

5. Сила тока в катушке равномерно уменьшилась от $I_1 = 10 \text{ А}$ до $I_2 = 5,0 \text{ А}$. При этом энергия магнитного поля изменилась на $\Delta W_M = -3,0 \text{ Дж}$. Определите индуктивность катушки и первоначальное значение энергии магнитного поля.

6. Определите ЭДС самоиндукции, возникающую в катушке, индуктивность которой $L = 0,12 \text{ Гн}$, при равномерном уменьшении силы тока от $I_1 = 8,0 \text{ А}$, если за промежуток времени $t_1 = 0,20 \text{ с}$ энергия магнитного поля уменьшилась в $\alpha = 2,0$ раза.

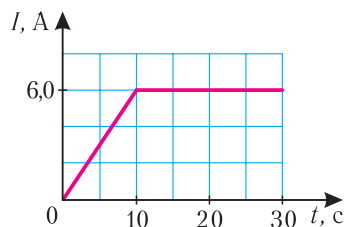


Рис. 188



§ 33-1

§ 33-2