

провод оказывает переменному току сопротивление приблизительно в 3,5 раза большее, чем постоянному току. При $\nu=10^6$ герц такое возрастание сопротивления наблюдается для провода диаметром около 0,4 мм (так как при $\nu=10^6$ герц глубина проникновения, согласно приведенному выше выражению, $\xi=0,066$ мм). Для переменного тока с частотой в 50 герц ξ велико и скин-эффект сказывается только для очень толстых кабелей (медных или алюминиевых; в железных проводах вследствие большой магнитной проницаемости он проявляется сильнее).

Учитывая скин-эффект, провода для переменных токов высокой частоты обычно сплетают из большого числа тонких проводящих нитей, изолированных друг от друга эмалевым покрытием (*литцендрат*); для очень больших высокочастотных токов применяют также трубчатые провода.

§ 73. Явление самоиндукции. Индуктивность. Законы нарастания и спада тока при включении и выключении цепи

При изменении величины тока в проводнике изменяется напряженность его магнитного поля. Энергия магнитного поля, окружающего проводник, растет по мере увеличения тока. На образование магнитного поля должна быть затрачена работа. Эта работа производится источником электрического тока (гальваническим элементом, динамо-машиной и т. д.). Поэтому можно сказать, что *энергия магнитного поля тока возникает за счет электрической энергии тока.*

Включая в замкнутую проводящую цепь источник электрического тока, можно обнаружить, что ток в цепи не сразу достигает той величины, которую ток в этой цепи должен иметь по закону Ома. Ток увеличивается *п о с т е п е н н о*, так как вначале происходит нарастание магнитного поля, или, иначе говоря, происходит превращение электрической энергии в магнитную.

Размыкая проводник, по которому шел ток и вокруг которого существовало, следовательно, магнитное поле, можно обнаружить явление *обратного превращения магнитной энергии в электрическую*: магнитное поле, окружавшее проводник, по которому шел ток, при размыкании тока должно исчезнуть, но *э н е р г и я* магнитного поля не может исчезнуть (это противоречило бы закону сохранения энергии); она возбуждает в проводнике электрический ток, т. е. превращается в электрическую энергию.

Постепенность нарастания тока при включении проводника в цепь, где действует электродвижущая сила, возбуждаемая каким-либо источником тока, можно объяснить с точки зрения закона Ома *возникновением в момент замыкания цепи обратной электродвижущей силы*, существующей, пока происходит образование магнитного

поля, и дающей в проводнике ток, направленный противоположно току, питающему цепь. При размыкании цепи, когда происходит исчезновение магнитного поля, в проводнике возникает электродвижущая сила, которая, после того как прекращено питание проводника током извне, дает в проводнике в течение некоторого времени ток того же направления, какое имел ток, питавший цепь. Очевидно, здесь мы имеем дело с одним из случаев электромагнитной индукции. Так как в данном случае проводник индуцирует ток в самом себе, то это явление носит название *самоиндукции*; индуцированный в проводнике ток называют *экстраток*. Экстраток при замыкании направлен против замыкаемого тока; экстраток размыкания — одного направления с размыкаемым током.

Возьмем катушку с большим числом оборотов проволоки и к концам ее присоединим гальванометр (рис. 313). Пропустим через эту катушку ток от элемента E . Часть тока пройдет через гальванометр и вызовет отклонение его стрелки вправо. Если разомкнуть цепь, питающую катушку, подняв ключ K , то возникнет экстраток размыкания, путь которого показан на рисунке пунктирными стрелками. В катушке экстраток размыкания имеет такое же направление, какое имел ток от элемента, но так как нижняя часть цепи теперь разомкнута, то через гальванометр он пройдет в противоположном направлении и вызовет отклонение (бросок) стрелки гальванометра влево. Если взять катушку, имеющую примерно 300 витков, и питать ее аккумулятором, дающим 2 в, то в момент размыкания цепи, питавшей катушку, вольтметр, присоединенный к концам катушки, отмечает скачок напряжения примерно до 20 в.

При выключении в цепи тока большого электромагнита вследствие появления экстратoka размыкания у ключа образуется искра, а иногда загорается дуга. Размыкание токов в сети с электромагнитами нужно делать осторожно; при быстром размыкании возникающая в обмотке электромагнита электродвижущая сила самоиндукции может попортить изоляцию проволоки обмотки. Во избежание этого производят размыкание, вводя постепенно в цепь электромагнита сопротивление.

По закону Био и Савара напряженность магнитного поля тока в любой заданной точке поля пропорциональна току I . Поэтому число Φ линий магнитной индукции, пронизывающих площадь, ограниченную контуром тока, при увеличении тока возрастает пропорционально току (мы имеем здесь в виду поле, создаваемое самим током, и не учитываем линий магнитной индукции, охватываемых

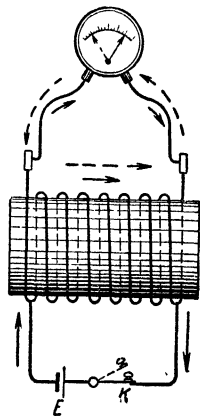


Рис. 313. Опыт Фарадея, показывающий явление самоиндукции.

контуром рассматриваемого тока, но созданных какими-либо другими расположенными по соседству токами и магнитами).

При заданной величине тока проводники различной формы и размеров охватываются неодинаковым числом линий магнитной индукции¹⁾. Величину, характеризующую форму и размеры проводника (поскольку размеры и форма проводника влияют на его электромагнитные свойства) и измеряемую потоком магнитной индукции сквозь площадь, ограниченную контуром проводника, при величине тока, равной единице, называют коэффициентом самоиндукции, или просто самоиндукцией проводника (а также индуктивностью), и обозначают буквой L (рис. 314).

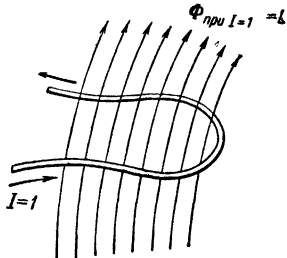


Рис. 314. Индуктивность проводника измеряется числом линий магнитной индукции, порождаемых током $I=1$.

Индуктивность L , как будет показано ниже, имеет размерность произведения длины на магнитную проницаемость. В связи с этим абсолютную единицу индуктивности часто называют *сантиметром*. Индуктивностью в 1 *см* обладает такой проводник, который при прохождении через него тока в 1 единицу CGSM охватывается 1 линией магнитной индукции. Если индуктивность проводника измерена в сантиметрах, то при величине тока I единиц CGSM число линий магнитной индукции, охватывающих проводник (поток в максвеллах), согласно сказанному определяется соотношением

$$\Phi = LI. \quad (5)$$

Вместо сантиметра в электротехнике часто применяют в 10^9 раз большую единицу индуктивности, называемую *генри* (сокращенно *гн* или *Н*). Проводник, индуктивность которого равна 1 *гн*, при токе в 1 единицу CGSM имеет в своем магнитном поле 10^9 линий индукции. Один ампер равен $\frac{1}{10}$ CGSM, значит, при токе в 1 *а* проводник с коэффициентом самоиндукции 1 *гн* охватывает 10^8 (т. е. 100 миллионов) линий индукции. Очевидно, что когда ток измерен в амперах, а индуктивность проводника выражена в генри, то число линий магнитной индукции, связанных с проводником (магнитный поток в максвеллах), определяется формулой.

$$\Phi = LI \cdot 10^8. \quad (6)$$

¹⁾ Это объясняется тем, что при вычислении напряженности поля тока приходится суммировать элементарные силы, определяемые по величине и направлению законом Био и Савара; примеры, рассмотренные в § 61, показывают, что при этом суммировании элементарных сил весьма сказывается форма токопроводящего контура. Обтекаемый током виток проволоки связан с большей магнитной энергией, чем такой же по длине участок прямолинейного тока.

Понятно, что если и магнитный поток измерять в практических единицах — в вольт-секундах (в веберах), то, поскольку 1 вольт-секунда равна 10^8 максвеллов, числовой коэффициент в формуле (6) исчезает и получается формула (5), в которой теперь все три величины выражены в практической системе единиц.

Вычисление коэффициентов самоиндукции L , вообще говоря, представляет значительные трудности и может быть сделано только для небольшого числа простейших частных случаев; однако всегда является возможным определить L непосредственно из опыта.

Электродвижущая сила индукции определяется законом Фарадея:

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8} \text{ вольт,}$$

где Φ выражено в абсолютных единицах (максвеллах).

Преобразуем эту формулу, воспользовавшись приведенным выше выражением для потока магнитной индукции. Подставив Φ из формулы (6) и рассматривая обычный случай, когда коэффициент самоиндукции L при замыкании или размыкании цепи (и вообще при изменении тока) остается неизменным, получим:

$$\mathcal{E} = -L \frac{dI}{dt} \text{ вольт.} \quad (7)$$

Здесь L измерено в генри, а I — в амперах. Знак минус в этой формуле указывает, что при возрастании тока электродвижущая сила самоиндукции направлена противоположно току, а при убывании тока (когда $dI < 0$) электродвижущая сила самоиндукции направлена в ту же сторону, что и ток.

В формуле (7) отсутствует числовой коэффициент, имеющийся в формуле Фарадея; это является следствием соответствующего выбора практической единицы индуктивности; мы видим, что 1 генри представляет собой индуктивность такого проводника, в котором при быстроте изменения тока в 1 ампер в секунду индуцируется электродвижущая сила в 1 вольт.

Как уже упоминалось, при подключении электродвижущей силы \mathcal{E}_0 к проводящей цепи, имеющей сопротивление R , нарастание тока вследствие индуктивности цепи будет происходить постепенно, так как наряду с подключенной электродвижущей силой \mathcal{E}_0 будет действовать обратная по направлению электродвижущая сила самоиндукции \mathcal{E} , определяемая формулой (7). В любой момент ток по закону Ома будет равен

$$I = \frac{\mathcal{E}_0 + \mathcal{E}_{\text{самоинд}}}{R} = \frac{\mathcal{E}_0}{R} - \frac{L}{R} \frac{dI}{dt}.$$

Чтобы установить закон нарастания тока, проинтегрируем напи-

санное выражение, в котором переменные легко разделяются. Поскольку

$$I - \frac{\mathcal{E}_0}{R} = - \frac{L}{R} \frac{dI}{dt},$$

то

$$- \frac{R}{L} dt = \frac{dI}{I - \frac{\mathcal{E}_0}{R}} \quad (a)$$

и, стало быть, если при $t=0$ и $I=0$,

$$- \frac{R}{L} t = \ln \frac{I - \frac{\mathcal{E}_0}{R}}{- \frac{\mathcal{E}_0}{R}},$$

т. е.

$$I - \frac{\mathcal{E}_0}{R} = - \frac{\mathcal{E}_0}{R} \cdot e^{-\frac{Rt}{L}},$$

или

$$I = I_0 (1 - e^{-\frac{R}{L} t}), \quad (8)$$

где I_0 — предельная величина тока:

$$I_0 = \frac{\mathcal{E}_0}{R}.$$

Рис. 315 графически поясняет этот закон нарастания тока. Чем больше отношение $\frac{R}{L}$, т. е. чем больше сопротивление цепи

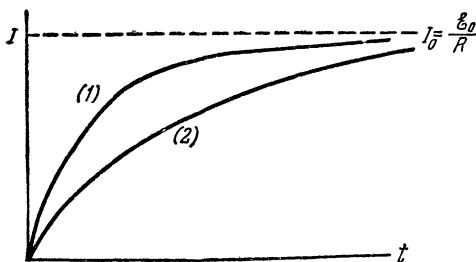


Рис. 315. Чем больше отношение $\frac{R}{L}$, тем круче происходит нарастание тока при включении в цепь электродвижущей силы $\left(\frac{R_1}{L_1} > \frac{R_2}{L_2}\right)$.

и меньше ее индуктивность, тем круче происходит нарастание тока.

По смыслу вывода уравнение (а) справедливо также и для случая выключения тока. Интегрируя уравнение (а) для указан-

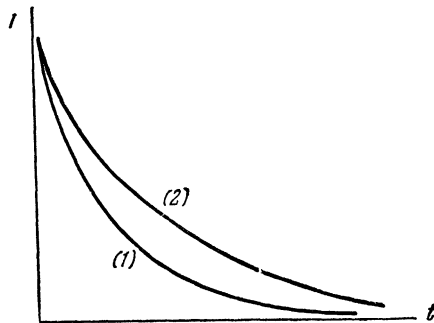


Рис. 316. Убывание тока при размыкании цепи. Кривая 1 — для цепи с большим сопротивлением и малой индуктивностью, кривая 2 — для цепи с меньшей величиной отношения R/L .

ного случая, когда $\mathcal{E}_0 = 0$ и при $t=0$ $I = I_0$, получаем:

$$-\frac{R}{L}t = \ln \frac{I}{I_0},$$

т. е.

$$I = I_0 e^{-\frac{R}{L}t}. \quad (9)$$

Рис. 316 поясняет этот закон убывания тока при выключении из цепи электродвижущей силы, создававшей ток I_0 .

§ 74. Энергия магнитного поля тока. Индуктивность и энергия электромагнита. Индуктивность кабеля

Энергия магнитного поля может быть подсчитана, если известны напряженность поля в любой точке и магнитная проницаемость. Весь объем, в котором имеется магнитное поле, делят на бесконечно малые элементы объема и, в согласии с формулой (12) в § 58, считают, что в каждом таком элементе находится количество магнитной энергии, пропорциональное квадрату напряженности поля в данном элементе объема. Энергия всего магнитного поля получается, если проинтегрировать ее значение для всех элементов объема того пространства, в котором имеется поле. В итоге аналогично энергии электрического поля энергия магнитного поля выражается формулой

$$W = \int \frac{\mu H^2}{8\pi} dv. \quad (10)$$