Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра физики

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ И САМОИНДУКЦИИ

Методические указания
к лабораторной работе по физике
для студентов инженерно-технических специальностей

Минск
БНТУ
2011

.0УДК 537.85(076.5)(075.8)
ББК 22.334я7
И 39

Составители:
П.Г. Кужир, А.А. Баранов, Н.П. Юркевич, Г.К. Савчук

Рецензенты:
В.И. Кудин, В.А. Потачиц

В издании изложены классические представления о явлениях электромагнитной индукции и самоиндукции. Рассмотрены закономерности изменения электрического тока при замыкании и размыкании электрической цепи, обладающей значительной индуктивностью. Описан метод определения постоянной времени электрической цепи.

Цель работы: изучить явления электромагнитной индукции и самоиндукции, исследовать экстратоки при замыкании и размыкании электрической цепи, определить постоянную времени при замыкании цепи, измерить ЭДС самоиндукции при размыкании цепи.

Оборудование и материалы: осциллограф, генератор напряжения, лабораторный стенд.

Явление электромагнитной индукции

Рассмотрим поверхность, ограниченную контуром и помещенную в магнитное поле с индукцией $\vec{B}$. Выбор поверхности и ее ориентация в пространстве определяется единичным вектором нормали $\vec{n}$, проведенным к данной поверхности (рис. 1). Тогда ориентированный элемент площади поверхности $d\vec{S}$ определяется как

$$d\vec{S} = \vec{n}dS,$$

где dS – величина элемента площади поверхности.

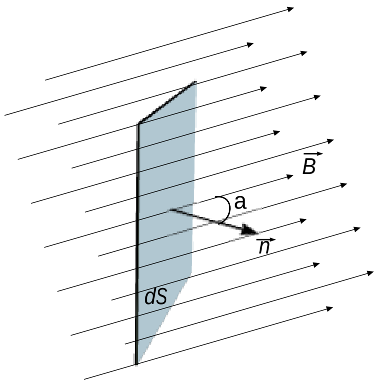


Рис.1. Определение ориентации элемента поверхности dS в магнитном поле

Потоком вектора магнитной индукции $\vec{B}$ или **магнитным потоком** через поверхность $d\vec{S}$ называется величина

$$d\Phi = \vec{B} \cdot d\vec{S}. \qquad (1)$$

Скалярное произведение двух векторов может быть записано в виде

$$d\Phi = \vec{B} \cdot d\vec{S} = \vec{B}\vec{n}dS = BdS\cos\alpha = B_n dS, \qquad (2)$$

где $B_n = B\cos\alpha$ – проекция вектора магнитной индукции $\vec{B}$ на вектор нормали $\vec{n}$;

α – угол между вектором нормали $\vec{n}$ к поверхности и вектором магнитной индукции $\vec{B}$ (рис. 1).

Индукция магнитного поля В измеряется в теслах (Тл). **Индукция магнитного поля в 1 Тл численно равна максимальной силе, действующей со стороны магнитного поля на проводник длиной 1 м, по которому течет ток 1 А.**

Полный магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, определяется интегрированием выражения (1) по площади поверхности S:

$$\Phi = \int_S \vec{B}d\vec{S} = \int_S \vec{B}\vec{n}dS = \int_S B_n dS.$$

Если поверхность плоская, а магнитное поле однородное ($B = \text{const}$) и направлено перпендикулярно поверхности ($\alpha = 0^\circ$, $\cos\alpha = 1$), то магнитный поток

$$\Phi = BS. \qquad (3)$$

Магнитный поток Ф измеряется в веберах (Вб). На основании (3) можно дать определение единицы измерения магнитного потока 1 **вебер** (1 Вб = 1Тл·1 м^2). **Магнитный поток равен 1 Вб, если он пронизывает поверхность единичной площади, находящуюся в однородном магнитном поле величиной в 1 Тл**, **направленном перпендикулярно поверхности.**

Из (2) следует, что изменить магнитный поток с течением времени t можно следующими способами.

1. Изменяя магнитное поле $B = f(t)$, не изменяя площади (S = const) и угла ориентации поверхности в пространстве (α = const);

2. Изменяя угол ориентации поверхности в пространстве по отношению к направлению магнитного поля $\alpha = f(t)$, не изменяя площади поверхности (S = const) и величины магнитного поля (B = const);

3. Изменяя площадь поверхности $S = f(t)$, не изменяя величины магнитного поля (B = const) и угла ориентации поверхности по отношению к направлению магнитного поля (α = const).

4. Изменяя все три величины одновременно, либо попарно при постоянной третьей.

Изменение магнитного потока является **причиной** возникновения явления электромагнитной индукции.

Электромагнитной индукцией называется явление возникновения индукционного электрического тока в замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром.

Объяснение появления индукционного тока в замкнутом неподвижном проводящем контуре, помещенного в переменное магнитное поле, дал Джордж Максвелл. Согласно Дж. Максвеллу **переменное магнитное поле пораждает переменное вихревое электрическое поле**, которое воздействует на свободные носители зарядов (электроны) в проводнике, заставляя их упорядоченно перемещаться, в результате чего и возникает индукционный электрический ток.

При изменении магнитного потока вторым и третьим способами магнитное поле остается постоянным и не может порождать вихревое электрическое поле. В этом случае индукционный ток возникает в результате действия силы Лоренца на свободные носители зарядов, которые перемещаются в магнитном поле вместе с движущимся контуром.

Явление электромагнитной индукции было экспериментально изучено в 1831 г. Майклом Фарадеем. **Закон электромагнитной индукции Фарадея** гласит: **в замкнутом проводящем контуре ЭДС индукции ε_i, порождающая индукционный ток I_i, пропорциональна скорости убывания магнитного потока Ф через любую поверхность, ограниченную данным контуром:**

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}. \tag{4}$$

Знак минус в выражении (4) соответствует правилу Ленца.

Правило Ленца: индукционный ток всегда направлен так, чтобы своим магнитным полем создавать магнитный поток, препятствующий изменению магнитного потока, пронизывающего поверхность, ограниченную данным контуром.

Поясним, как применять правило Ленца. Пусть изменение магнитного потока Ф происходит за счет изменения величины магнитного поля, пронизывающего контур постоянной площади (рис. 2, *а*), который не меняет своей ориентации по отношению к направлению вектора $\vec{B}$.

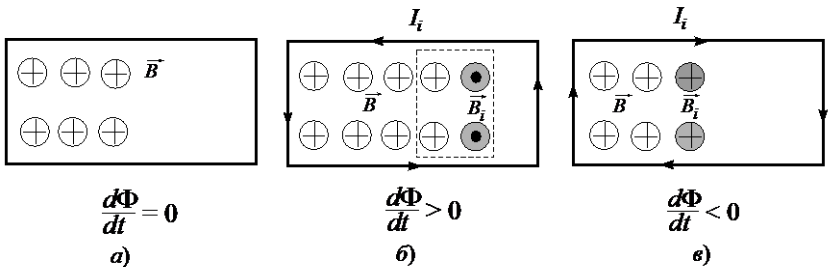


Рис. 2. К пояснению правила Ленца:
магнитный поток не изменяется (*а*), увеличивается (*б*), уменьшается (*в*)

Изменение магнитного потока Ф означает либо **увеличение** магнитного потока, либо его **убыль**. Если магнитный поток увеличивается (рис. 2, *б*), то магнитное поле $\vec{B}_i$ индукционного тока своим магнитным потоком должно препятствовать этому росту. Следовательно, вектор $\vec{B}_i$ должен быть направлен противоположно вектору магнитного поля $\vec{B}$, что и показано серыми кружками с точкой на рис. 2, *б*. В этом случае поток поля индукционного тока будет ослаблять нарастание потока Ф внешнего магнитного поля $\vec{B}$ ровно настолько, насколько происходит его увеличение в данный момент времени.

Если магнитный поток убывает (рис. 2, *в*), то магнитное поле $\vec{B}_i$ индукционного тока должно создавать магнитный поток, компенсирующий данную убыль. Поэтому, вектор индукции магнитного поля $\vec{B}_i$ будет направлен в ту же сторону, что и вектор $\vec{B}$. В этом случае вектора $\vec{B}$ и $\vec{B}_i$ складываются. При этом **результирующий магнитный поток**, создаваемый полями $\vec{B}$ и $\vec{B}_i$, **остается неизменным**. Зная направление вектора $\vec{B}_i$, по правилу буравчика определяется направление индукционного тока I_i (рис. 2, *б*, *в*).

Таким образом, чтобы по правилу Ленца определить направление индукционного тока необходимо:

1. Определить, возрастает или уменьшается магнитный поток, пронизывающий поверхность, ограниченную контуром.

2. Изобразить вектор $\vec{B}$ внешнего магнитного поля, в котором находится проводящий контур.

3. Изобразить вектор $\vec{B}_i$ магнитного поля индукционного тока I_i. При **увеличении** магнитного потока Ф вектора $\vec{B}$ и $\vec{B}_i$ будут **направлены в противополжные стороны**, при **убыли** – вектора $\vec{B}$ и $\vec{B}_i$ будут **сонаправлены**.

4. Применить правило буравчика: поступательное движение буравчика должно совпадать с направлением вектора $\vec{B}_i$ индукционного тока, тогда направление вращения ручки буравчика покажет направление протекания индукционного тока I_i по контуру.

Согласно явлению электромагнитной индукции, индукционный ток возникает в замкнутом контуре. Поэтому величину силы индукционного тока можно определить по закону Ома для замкнутой цепи

$$I_i = \frac{\varepsilon_i}{R},$$

где R – сопротивление контура.

Явление электромагнитной индукции имеет широкое практическое применение. На этом явлении основана работа генераторов переменного тока. В генераторах изменение магнитного потока осуществляется, как правило, за счет изменения угла ориентации контура по отношению к направлению постоянного магнитного поля (вращающаяся рамка – ротор, покоящийся магнит – статор). Если контур вращается с циклической частотой ω относительно линий индукции внешнего магнитного поля $\vec{B}$, то магнитный поток Ф, пронизывающий контур площадью S, записывается в виде

$$\Phi = BS\cos\omega t,$$

где t – текущее время.

Тогда, в соответствии с законом Фарадея для электромагнитной индукции, в рамке возникает ЭДС индукции

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -BS\frac{d(\cos\omega t)}{dt} = BS\omega\sin\omega t.$$

Отсюда видно, что максимальная ЭДС индукции составляет

$$\varepsilon_{\max} = BS\omega.$$

Таким образом, в генераторах ЭДС индукции изменяется по гармоническому закону и зависит от циклической частоты ω вращения контура. Максимальная ЭДС индукции, возникающая во вращающемся контуре, определяется величиной индукции внешнего магнитного поля B, площадью контура S и частотой его вращения ω.

Явление самоиндукции

Явление электромагнитной индукции возникает в результате изменения магнитного потока, вызванного внешними причинами: изменением внешнего магнитного поля, вращением контура, изменением площади поверхности контура. При этом первоначально в контуре электрический ток отсутствует. Однако индукционный ток может возникать в замкнутом контуре в силу «внутренней» причины, согласно которой изменение магнитного потока, связано с электрическим током, текущим в контуре. Такое явление получило название явления самоиндукции.

Таким образом, **явлением самоиндукции называется явление возникновения индукционного тока в замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного потока, связанного с электрическим током, текущим в контуре**.

При этом в замкнутом контуре может протекать как переменный, так и постоянный электрический ток.

Рассмотрим, как связан магнитный поток с силой тока, текущего в контуре. Как видно из (1) или (2), магнитный поток пропорционален вектору магнитной индукции: $\Phi \sim B$.

С другой стороны, закон **Био–Савара–Лапласа** гласит, что **магнитное поле любого тока может быть вычислено как суперпозиция полей, создаваемых отдельными элементарными участками тока**:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0\mu}{4\pi} I \frac{\left[d\vec{l} \times \vec{r}\right]}{r^3},$$

где μ_0 – магнитная постоянная;

μ – магнитная проницаемость среды;

I – сила тока в проводнике;

$d\vec{l}$ – элементарный участок тока;

$\vec{r}$ – радиус-вектор, проведенный от элемента с током $d\vec{l}$ в точку пространства, в которой определяется индукция магнитного поля.

Для прямолинейного проводника с током (рис. 3) закон Био–Савара–Лапласа будет иметь вид

$$B = \frac{\mu_0\mu}{4\pi} I \int \frac{dI \sin\alpha}{r^2},$$

где r – модуль радиус-вектора $\vec{r}$;

α – угол между направлением тока в элементе $d\vec{l}$ и радиус-вектором $\vec{r}$.

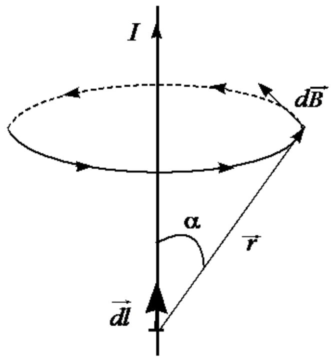


Рис. 3. К определению вектора индукции магнитного поля прямолинейного проводника с током

Из закона Био–Савара–Лапласа следует, что величина индукции магнитного поля B проводника с током пропорциональна силе тока I, текущего по проводнику: $B \sim I$. Следовательно, магнитный поток, связанный с текущим в контуре током, пропорционален силе тока I

$$\Phi \sim I.$$

Вводя коэффициент пропорциональности L, называемый индуктивностью контура, для магнитного потока получаем

$$\Phi = LI \; . \tag{5}$$

Из (5) следует, что **индуктивность L контура численна равна магнитному потоку, сцепленному с контуром, при силе тока в контуре равной 1 А.**

За единицу измерения индуктивности в СИ принят 1 Генри (Гн). Контур имеет **индуктивность 1 Гн**, **если сила тока в контуре в 1 А приводит к возникновению магнитного потока в 1 Вб через любую поверхность, ограниченную контуром**.

Индуктивность является характеристикой контура, поэтому **зависит от формы и его геометрических размеров, а также от магнитных свойств среды, в которую помещен контур**.

При изменении магнитного потока возникает ЭДС самоиндукции и, следовательно, индукционный ток. Подставляя (5) в (4), получим выражение для ЭДС самоиндукции

$$\varepsilon_S = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(IL)}{dt} = -L\frac{dI}{dt} - I\frac{dL}{dt}. \tag{6}$$

Выражение (6) представляет собой **формулу для вычисления ЭДС самоиндукции.**

Из (6) следует, что появление индукционного тока I_i в контуре происходит по следующим схемам:

а) для переменного тока

$I \to \frac{dI}{dt} \to \frac{d\Phi}{dt} \to \varepsilon_S \to I_i$ при L = const;

б) для постоянного тока

$L \to \frac{dL}{dt} \to \frac{d\Phi}{dt} \to \varepsilon_S \to I_i$ при I = const.

При этом нужно четко различать ток I, первоначально текущий в контуре, и индукционный ток I_i, порожденный ЭДС самоиндукции.

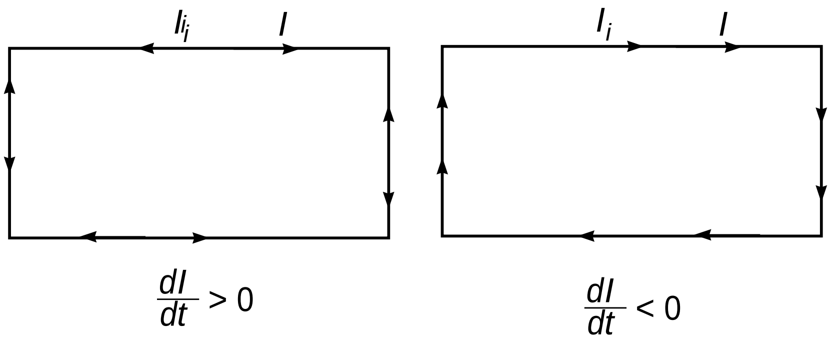
Если L = const, то (6) примет вид:

$$\varepsilon_S = -L\frac{dI}{dt}. \tag{7}$$

Знак минус в (6) и (7) показывает, что направление индукционного тока определяется правилом Ленца, также как и в случае явления электромагнитной индукции.

Правило Ленца для тока самоиндукции: ток самоиндукции всегда направлен так, чтобы своим магнитным полем создавать магнитный поток, препятствующий изменению магнитного потока, связанного с текущим в контуре электрическим током.

Если переменный ток в проводнике нарастает, то согласно (5) магнитный поток будет увеличиваться. Индукционный ток должен быть направлен так, чтобы своим магнитным полем создавать магнитный поток, препятствующий росту магнитного потока первоначально текущего по контуру тока. В этом случае магнитные потоки первоначального и индукционного токов вычитаются. Следовательно, индукционный ток будет течь в сторону противоположную направлению первоначального тока (рис. 4, *а*).



а) *б*)

Рис. 4. Применение правила Ленца к определению направления индукционного тока

В случае, когда переменный ток убывает, его магнитный поток уменьшается. Поэтому индукционный ток должен быть направлен так, чтобы препятствовать его убыли. То есть он будет сонаправлен с первоначальным током (рис. 4, *б*). В этом случае магнитные потоки будут складываться.

Явления самоиндукции и взаимной индукции широко используется в работе трансформаторов.

Экстратоки замыкания и размыкания цепи

Рассмотрим электрическую цепь (рис. 5), состоящую из резистора сопротивлением R, источника постоянного тока с ЭДС ε, катушки индуктивностью L и омическим сопротивлением r, ключа K. При этом внутренним сопротивлением источника тока пренебрегаем.

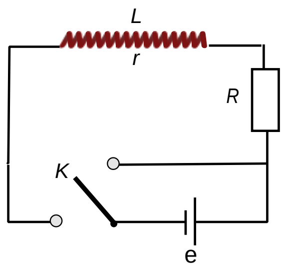


Рис. 5. Электрическая цепь

а) Экстраток при замыкании электричекой цепи

При замыкании ключа *К* в цепи, содержащей катушку, ток не сразу достигает своего постоянного значения I_0, определяемого законом Ома

$$I_0 = \frac{\varepsilon}{R + r},$$

а нарастает постепенно. Следовательно, можно говорить о том, что **индуктивность замкнутого контура** является **мерой инертности контура по оношению к изменению в нем силы тока**, т. е. понятие индуктивности в цепи аналогично понятию массы в механике.

Поскольку электрический ток, протекающий через катушку, монотонно возрастает, то и магнитный поток, пронизывающий катушку, также монотонно возрастает. Изменение магнитного потока приводит к возникновению в катушке ЭДС самоиндукции и соответствующему ей индукционному току.

Индукционный ток, который возникает в катушке в момент замыкания или размыкания электрической цепи, **называется экстратоком** замыкания или размыкания.

Согласно правилу Ленца, **экстраток замыкания направлен против основного тока, а экстраток размыкания – по направлению основного тока.**

Таким образом, в электрической цепи, содержащей катушку, в момент замыкания цепи наряду с ЭДС источника постоянного тока действует ЭДС самоиндукции. С учетом ЭДС самоиндукции закон Ома для замкнутой цепи имеет вид

$$I = \frac{\varepsilon + \varepsilon_S}{R + r}, \tag{8}$$

где $\varepsilon_S = -L\dfrac{dI}{dt}$.

Подставим ε_S в (8), тогда

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r} - \frac{L}{R + r}\frac{dI}{dt}. \tag{9}$$

Умножив левую и правую части уравнения (9) на $\dfrac{R + r}{L}$, получаем

$$I\frac{R + r}{L} = \frac{\varepsilon}{L} - \frac{dI}{dt}$$

или

$$\frac{dI}{dt} + I\frac{R + r}{L} = \frac{\varepsilon}{L}. \tag{10}$$

Уравнение (10) представляет собой неоднородное диффиренциальное уравнение первого порядка относительно переменной I. Введем обозначение

$$\tau = \frac{L}{R + r}, \qquad (11)$$

где τ представляет собой **постоянную времени** электрической цепи.

Уравнение (10) с учетом (11) примет вид

$$\frac{dI}{dt} + \frac{I}{\tau} = \frac{\varepsilon}{L}. \qquad (12)$$

Общее решение неоднородного дифференциального уравнения (12) будем искать как

$$I = I_1 + I_{2.},$$

где I_1 – решение однородного уравнения вида $\frac{dI}{dt} + \frac{I}{\tau} = 0$;

I_2 – частное решение неоднородного уравнения вида $\frac{dI}{dt} + \frac{I}{\tau} = \frac{\varepsilon}{L}$.

Найдем решение I_1 однородного уравнения

$$\frac{dI}{dt} + \frac{I}{\tau} = 0.$$

Разделим переменные и получим

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{I}{\tau};$$

$$\frac{dI}{I} = -\frac{dt}{\tau}. \tag{13}$$

Проинтегрируем (13):

$$\int \frac{dI}{I} = -\int \frac{dt}{\tau}.$$

Получим

$$\ln I = -\frac{t}{\tau} + \ln C,$$

где $\ln C$ – константа интегрирования.

Тогда

$$\ln I - \ln C = -\frac{t}{\tau},$$

$$\ln \frac{I}{C} = -\frac{t}{\tau}$$

По определению логарифма

$$\frac{I}{C} = e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Тогда решение однородного уравнения имеет вид

$$I_1 = C e^{-\frac{t}{\tau}}. \tag{14}$$

Частное решение неоднородного уравнения можно записать как

$$I_2 = \frac{\varepsilon}{L} \tau. \tag{15}$$

Если выражение (15) подставить в уравнение (12), то получим тождество. Следовательно, выражение (15) является частным решением неоднородного уравнения (12).

Сумма двух решений (14) и (15) дает общее решение дифференциального уравнения (10)

$$I = I_1 + I_2 = C\,\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{\varepsilon}{L}\tau\,.$$

Учитывая замену (11) для постоянной времени τ цепи, имеем

$$I = C\,\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{\varepsilon}{R+r} = C\,\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}} + I_0\,.$$

Определим постоянную C из граничных условий. При $t = 0$ сила тока $I = 0$, тогда

$$C = -I_0.$$

Общее решение уравнения (10) примет вид

$$I = I_0(1 - \mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}})\,. \qquad (16)$$

Функция (16) представляет **зависимость нарастания тока в цепи** с катушкой индуктивностью L с течением времени t после замыкания ключа, то есть после подключения источника постоянного тока. Вид функции (16) показан на рис. 6.

Данная зависимость представляет собой результат сложения основного тока и экстратока замыкания. В начальный момент времени $t = 0$ множитель $\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}} = 1$ и ток $I = 0$. С течением времени электрический ток достигнет своего максимального значения I_0 и станет постоянным.

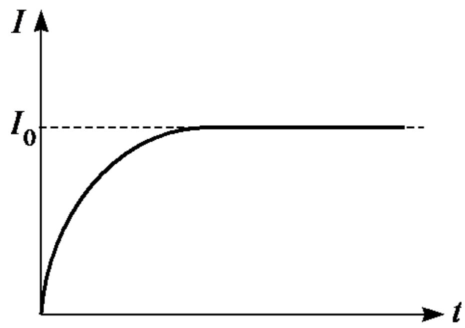


Рис. 6. Вид функции нарастания тока при замыкании цепи

Рассмотрим, от чего зависит, насколько быстро в электрической цепи устанавливается постоянный ток I_0 после замыкания ключа. Из анализа выражения (16) следует, что $I \to I_0$, если функция $e^{-\frac{t}{\tau}}$ стремиться к нулю. Для этого показатель экспоненты

$$\frac{t}{\tau} = \frac{t}{L}(R + r).$$

должен быть бесконечно большим.

Это возможно в следующих случаях:

1. Электрическая цепь имеет большие омические сопротивления резистора R и катушки r при малой индуктивности катушки L. Тогда отношение $\frac{R + r}{L}$ становится бесконечно большой величиной и $e^{-\frac{t}{\tau}} \to 0$, а $I \to I_0$.

2. Время установления постоянного тока является очень большим. Тогда можно полагать, что t стремиться к бесконечности, $e^{-\frac{t}{\tau}} \to 0$, а $I \to I_0$.

Из пункта 1 следует, **что время, в течение которого в электрической цепи устанавливается постоянный ток**,

определяется величиной омического сопротивления цепи и ее индуктивностью.

б) Экстраток при разамыкании электричекой цепи

Определим характер изменения силы тока при размыкании электрической цепи, изображенной на рис. 5. Когда ключ замкнут, сила тока в цепи постоянная и равна I_0. При размыкании ключа, ток постепенно начинает убывать. По мере убывания тока в катушке убывает магнитное поле, что приводит к возбуждению в катушке ЭДС самоиндукции, а, следовательно, и индукционного тока, который и представляет собой экстраток размыкания. Выражения для закона Ома при размыкании цепи примет вид

$$I = \frac{\varepsilon_S}{R + r}. \tag{17}$$

Подставив в (17) $\varepsilon_S = -L\frac{dI}{dt}$, имеем

$$I = -\frac{L}{R + r}\frac{dI}{dt} \quad . \tag{18}$$

Умножив левую и правую части уравнения (18) на $\frac{R + r}{L}$, получим

$$\frac{dI}{dt} = -I\,\frac{R + r}{L}.$$

С учетом выражения (11) разделяем переменные и интегрируем

$$\frac{dI}{I} = -\frac{dt}{\tau}, \quad \int\limits_{I_0}^{I}\frac{dI}{I} = -\int\limits_{0}^{t}\frac{dt}{\tau}.$$

Получаем **зависимость**, **согласно которой изменение электрического тока при размыкании электрической цепи происходит по экспоненте**

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}. \qquad (19)$$

Из выражения (19) определим физический смысл постоянной времени τ электрической цепи. Пусть $t = \tau$, тогда

$$I = \frac{I_0}{e}.$$

Следовательно, **постоянная времени электрической цепи – это физическая величина, численна равная времени, в течение которого электрический ток при размыкании цепи убывает в е раз**.

График зависимости (19) представлен на рис. 7. Приведенная кривая описывает характер изменения электрического тока при размыкании цепи, содержащей замкнутый контур индуктивностью L. В начальный момент времени при $t = 0$ множитель $e^{-\frac{t}{\tau}} = 1$ и $I = I_0$. При $t \to \infty$ множитель $e^{-\frac{t}{\tau}} \to 0$ и ток $I \to 0$.

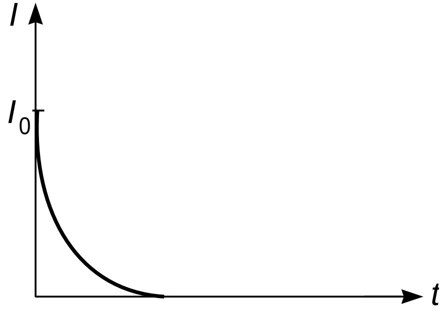


Рис. 7. Вид функции изменения тока при размыкании цепи

На основании выражения (19) можно определить ЭДС самоиндукции при размыкании цепи. Дифференцируем по времени выражение (19)

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{1}{\tau} I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Тогда для величины ЭДС самоиндукции при размыкании цепи получаем

$$\varepsilon_S = -L\frac{dI}{dt} = -L\left(-\frac{1}{\tau} I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = \frac{L}{\tau} I_0 e^{-\frac{t}{\tau}},$$

$$\varepsilon_S = \frac{L(R+r)}{L} I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} = (R+r) I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} = \varepsilon e^{-\frac{t}{\tau}} = \varepsilon e^{-\frac{t(R+r)}{L}},$$

где ε – ЭДС источника постоянного тока.

Таким образом, ЭДС самоиндукции определяется отношением омического сопротивления цепи к индуктивности катушки и может достигать значений в несколько раз превышающих ЭДС источника постоянного тока, что может вызывать пробой в электрической цепи.

Обоснование метода определения постоянной времени цепи

Функция (16) описывает нарастание тока в электрической цепи, которая содержит катушку интуктивностью L и резистор сопротивлением R, после подключения источника постоянного тока. Изменение напряжения на резисторе можно определить по закону Ома для однородного участка цепи

$$U(t) = IR = I_0(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})R = U_0(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \qquad (20)$$

где $U_0 = I_0 R$.

При $t \to \infty$, $U \to U_0$. Функцию $U(t)$ в соответствии с (20) можно наблюдать на экране осциллографа. Измеряя время t и соответствующее ему значение U, можно определить постоянную времени τ цепи.

Для определения величины τ удобно измерить время t_0, соответствующее $U = \frac{U_0}{2}$. Тогда из (20) следует, что

$$\frac{U_0}{2} = U_0(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad \text{или} \quad \frac{1}{2} = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}}. \tag{21}$$

Выражая из (21) экспоненту и логарифмируя ее, получаем

$$e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{1}{2}, \quad e^{\frac{t}{\tau}} = 2, \quad \frac{t_0}{\tau} = \ln 2. \tag{22}$$

Из выражения (22) находим, что постоянная времени цепи

$$\tau = \frac{t_0}{\ln 2} = \frac{t_0}{0{,}693}, \tag{23}$$

где t_0 – время, соответствующее $U = \frac{U_0}{2}$.

Порядок выполнения работы

1. Перед выполнением подготовить карандаш, линейку и калькулятор.
2. Включить осциллограф, генератор и лабораторный стенд с электросхемой.
3. Получить на экране осциллографа прямоугольный импульс, зарисовать его в рабочую тетрадь, измерить его амплитуду и записать ее значение в рабочую тетрадь.

4. Получить на экране осциллографа кривую изменения силы тока при замыкании цепи, измерить время t_0 и по формуле (23) определить постоянную времени цепи для случая, когда индуктивность контура равна $L = L_1 + L_2$. Зарисовать кривую изменения силы тока при замыкании цепи в рабочую тетрадь. Выяснить влияние различных значений L на постоянную времени электрической цепи, для чего провести эксперимент при $L = L_1$. Сделать вывод.

5. Получить на осциллографе кривую изменения силы тока при размыкании цепи и зарисовать в рабочую тетрадь. Записать закон, который описывает вид полученной зависимости.

6. Получить на осциллографе вид кривой для ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_s$ при размыкании цепи, зарисовать ее в рабочую тетрадь. Измерить величину ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_s$ при размыкании цепи в зависимости от значений L и R электрической цепи. Полученные данные записать в рабочую тетрадь. Проанализировать зависимость ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_s$ от значений величин L и R. Сравнить значение $\mathcal{E}_s$ с амплитудой входного импульса от генератора постоянного тока. Сделать вывод.

Контрольные вопросы

1. В чем суть явления электромагнитной индукции?
2. Сформулируйте закон электромагнитной индукции.
3. Дайте определение магнитного потока.
4. Какие причины вызывают изменение магнитного потока?
5. Каким образом можно объяснить возникновение индукционного тока в контуре в явлении электромагнитной индукции?
6. Сформулируйте правило Ленца и примените его к определению направления индукционного тока в явлениях электромагнитной индукции и самоиндукции.
7. В чем суть явления самоиндукции?
8. Сформулируйте закон Био–Савара–Лапласа.

9. Покажите связь магнитного потока с текущим по контуру током, исходя из закона Био–Савара–Лапласа.

10. Дайте определение единицам измерения 1 Вб, 1 Гн, 1Тл.

11. Что такое индуктивность контура и от чего она зависит?

12. Запишите и поясните формулу для ЭДС самоиндукции.

13. Что такое экстратоки замыкания и размыкания?

14. Что характеризует и как определяется постоянная цепи?

15. Выведите зависимость изменения экстратока при замыкании цепи с течением времени.

16. Выведите зависимость изменения экстратока при размыкании цепи с течением времени.

17. Поясните метод определения постоянной времени цепи, используемый в работе.

Литература

1. Савельев, И.В. Курс общей физики: в 3 т. / И.В. Савельев. – М.: Наука, 1977–1989. – Т. 1–3.
2. Детлаф, А.А. Курс физики: в 3 т. / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М.: Высшая школа, 1973–1979. – Т. 1–3.
3. Сивухин, Д.В. Общий курс физики: в 5 т. / Д.В. Сивухин. – М.: Наука, 1977–1990. – Т. 1–5.
4. Матвеев, А.Н. Курс общей физики / А.Н. Матвеев. – М.: Высшая школа, 1976–1989.

Учебное издание

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ И САМОИНДУКЦИИ

Методические указания
к лабораторной работе по физике
для студентов инженерно-технических специальностей

Составители:
КУЖИР Павел Григорьевич
БАРАНОВ Артур Александрович
ЮРКЕВИЧ Наталья Петровна
САВЧУК Галина Казимировна

Компьютерная верстка Д.А. Исаева

Подписано в печать 16.05.2011.
Формат 60×84 $^1/_{16}$. Бумага офсетная.
Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 1,51. Уч.-изд. л. 1,18. Тираж 100. Заказ 1203.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский национальный технический университет.
ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.
Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.