

## Самоиндукция

Темы кодификатора ЕГЭ: самоиндукция, индуктивность, энергия магнитного поля.

Самоиндукция является частным случаем электромагнитной индукции. Оказывается, что электрический ток в контуре, меняющийся со временем, определённым образом воздействует сам на себя.

*Ситуация 1.* Предположим, что сила тока в контуре возрастает. Пусть ток течёт против часовой стрелки; тогда магнитное поле этого тока направлено вверх и увеличивается (рис. 1).

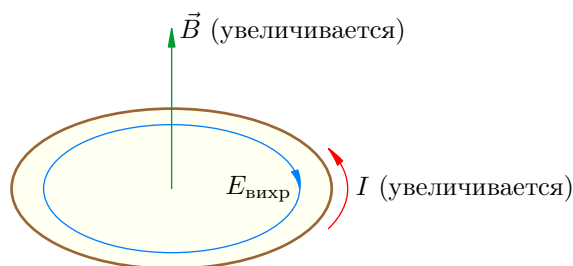


Рис. 1. Вихревое поле препятствует увеличению тока

Таким образом, наш контур оказывается в переменном магнитном поле своего собственного тока. Магнитное поле в данном случае возрастает (вместе с током) и потому порождает вихревое электрическое поле, линии которого направлены по часовой стрелке в соответствии с правилом Ленца.

Как видим, вихревое электрическое поле направлено против тока, препятствуя его возрастанию; оно как бы «тормозит» ток. Поэтому при замыкании любой цепи ток устанавливается не мгновенно — требуется некоторое время, чтобы преодолеть тормозящее действие возникающего вихревого электрического поля.

*Ситуация 2.* Предположим теперь, что сила тока в контуре уменьшается. Магнитное поле тока также убывает и порождает вихревое электрическое поле, направленное против часовой стрелки (рис. 2).

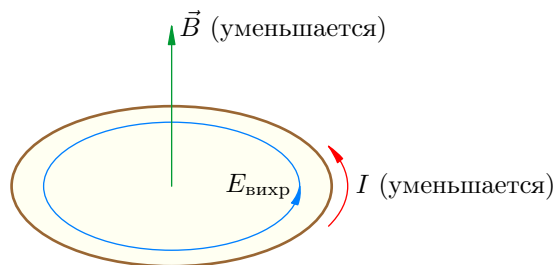


Рис. 2. Вихревое поле поддерживает убывающий ток

Теперь вихревое электрическое поле направлено в ту же сторону, что и ток; оно поддерживает ток, препятствуя его убыванию.

Как мы знаем, работа вихревого электрического поля по перемещению единичного положительного заряда вокруг контура — это ЭДС индукции. Поэтому мы можем дать такое определение.

Явление самоиндукции состоит в том, что при изменении силы тока в контуре возникает ЭДС индукции в этом же самом контуре.

При возрастании силы тока (в ситуации 1) вихревое электрическое поле совершает отрицательную работу, тормозя свободные заряды. Стало быть, ЭДС индукции в этом случае отрицательна.

При убывании силы тока (в ситуации 2) вихревое электрическое поле совершает положительную работу, «подталкивая» свободные заряды и препятствуя убыванию тока. ЭДС индукции в этом случае также положительна<sup>1</sup>.

## Индуктивность

Мы знаем, что магнитный поток, пронизывающий контур, пропорционален индукции магнитного поля:  $\Phi \sim B$ . Кроме того, опыт показывает, что величина индукции магнитного поля контура с током пропорциональна силе тока:  $B \sim I$ . Стало быть, магнитный поток через поверхность контура, создаваемый магнитным полем тока в этом самом контуре, пропорционален силе тока:  $\Phi \sim I$ .

Коэффициент пропорциональности обозначается  $L$  и называется *индуктивностью* контура:

$$\Phi = LI. \quad (1)$$

Индуктивность зависит от геометрических свойств контура (формы и размеров), а также от магнитных свойств среды, в которую помещён контур<sup>2</sup>. Единицей измерения индуктивности служит *генри* (Гн).

Допустим, что форма контура, его размеры и магнитные свойства среды остаются постоянными (например, наш контур — это катушка, в которую не вводится сердечник); изменение магнитного потока через контур вызвано только изменением силы тока. Тогда  $\Delta\Phi = L\Delta I$ , и закон Фарадея  $\mathcal{E}_i = -\Delta\Phi/\Delta t$  приобретает вид:

$$\mathcal{E}_i = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} = -L\dot{I}. \quad (2)$$

Благодаря знаку «минус» в (2) ЭДС индукции оказывается отрицательной при возрастании тока и положительной при убывании тока, что мы и видели выше.

Рассмотрим два опыта, демонстрирующих явление самоиндукции при замыкании и размыкании цепи.

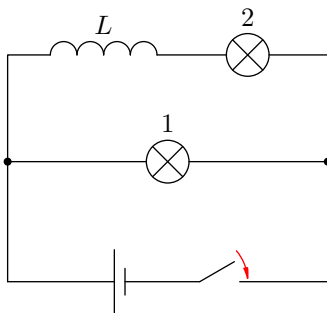


Рис. 3. Самоиндукция при замыкании цепи

<sup>1</sup>Нетрудно убедиться в том, что знак ЭДС индукции, определённый таким образом, согласуется с правилом выбора знака для ЭДС индукции, сформулированным в листке «Электромагнитная индукция».

<sup>2</sup>Улавливаете аналогию? Ёмкость конденсатора зависит от его геометрических характеристик, а также от диэлектрической проницаемости среды между обкладками конденсатора.

В первом опыте к батарее подключены параллельно две лампочки, причём вторая — последовательно с катушкой достаточно большой индуктивности  $L$  (рис. 3). Ключ вначале разомкнут.

При замыкании ключа лампочка 1 загорается сразу, а лампочка 2 — постепенно. Дело в том, что в катушке возникает ЭДС индукции, препятствующая возрастанию тока. Поэтому максимальное значение тока во второй лампочке устанавливается лишь спустя некоторое заметное время после вспыхивания первой лампочки.

Это время запаздывания тем больше, чем больше индуктивность катушки. Объяснение простое: ведь тогда больше будет напряжённость вихревого электрического поля, возникающего в катушке, и потому батарее придётся совершить большую работу по преодолению вихревого поля, тормозящего заряженные частицы.

Во втором опыте к батарее подключены параллельно катушка и лампочка (рис. 4). Сопротивление катушки много меньше сопротивления лампочки.

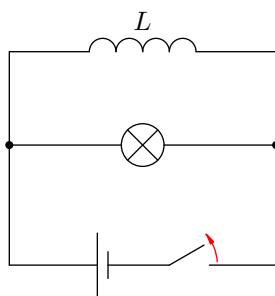


Рис. 4. Самоиндукция при размыкании цепи

Ключ вначале замкнут. Лампочка не горит — напряжение на ней близко к нулю из-за малости сопротивления катушки. Почти весь ток, идущий в неразветвлённой цепи, проходит через катушку.

При размыкании ключа лампочка ярко вспыхивает! Почему? Ток через катушку начинает резко убывать, и возникает значительная ЭДС индукции, поддерживающая убывающий ток (ведь ЭДС индукции, как видно из (2), пропорциональна скорости изменения тока).

Иными словами, при размыкании ключа в катушке появляется весьма большое вихревое электрическое поле, разгоняющее свободные заряды. Под действием этого вихревого поля через лампочку пробегает импульс тока, и мы видим яркую вспышку. При достаточно большой индуктивности катушки ЭДС индукции может стать существенно больше ЭДС батареи, и лампочка вовсе перегорит.

Лампочку-то, может, и не жалко, но в промышленности и энергетике данный эффект является серьёзной проблемой. Так как при размыкании цепи ток начинает уменьшаться очень быстро, возникающая в цепи ЭДС индукции может значительно превышать номинальные напряжения и достигать опасно больших величин. Поэтому в агрегатах, потребляющих большой ток, предусмотрены специальные аппаратные меры предосторожности (например, масляные выключатели на электростанциях), препятствующие моментальному размыканию цепи.

### Электромеханическая аналогия

Нетрудно заметить определённую аналогию между индуктивностью  $L$  в электродинамике и массой  $m$  в механике.

1. Чтобы разогнать тело до заданной скорости, требуется некоторое время — мгновенно изменить скорость тела не получается. При неизменной силе, приложенной к телу, это время тем больше, чем больше масса  $m$  тела.

Чтобы ток в катушке достиг своего максимального значения, требуется некоторое время; мгновенно ток не устанавливается. Время установления тока тем больше, чем больше индуктивность  $L$  катушки.

2. Если тело налетает на неподвижную стену, то скорость тела уменьшается очень быстро. Стена принимает на себя удар, и его разрушительное действие тем сильнее, чем больше масса тела.

При размыкании цепи с катушкой ток уменьшается очень быстро. Цепь принимает на себя «удар» в виде вихревого электрического поля, порождаемого убывающим магнитным полем тока, и этот «удар» тем сильнее, чем больше индуктивность катушки. ЭДС индукции может достичь столь больших величин, что пробой воздушного промежутка выведет из строя оборудование.

На самом деле эти *электромеханические аналогии* простираются довольно далеко; они касаются не только индуктивности и массы, но и других величин, и оказываются весьма полезными на практике. Мы ещё поговорим об этом в листке про электромагнитные колебания.

## Энергия магнитного поля

Вспомним второй опыт с лампочкой, которая не горит при замкнутом ключе и ярко вспыхивает при размыкании цепи. Мы непосредственно наблюдаем, что после размыкания ключа в лампочке выделяется энергия. Но откуда эта энергия берётся?

Берётся она, ясное дело, из катушки — больше неоткуда. Но что за энергия была запасена в катушке и как вычислить эту энергию? Чтобы понять это, продолжим нашу электромеханическую аналогию между индуктивностью и массой.

Чтобы разогнать тело массы  $m$  из состояния покоя до скорости  $v$ , внешняя сила должна совершить работу  $A$ . Тело приобретает кинетическую энергию, которая равна затраченной работе:  $K = A = mv^2/2$ .

Чтобы после замыкания цепи ток в катушке индуктивности  $L$  достиг величины  $I$ , источник тока должен совершить работу по преодолению вихревого электрического поля, направленного против тока. *Работа источника идёт на создание тока и превращается в энергию магнитного поля созданного тока.* Эта энергия запасается в катушке; именно эта энергия и выделяется потом в лампочке после размыкания ключа (во втором опыте).

Индуктивность  $L$  служит аналогом массы  $m$ ; сила тока  $I$  является очевидным аналогом скорости  $v$ . Поэтому естественно предположить, что для энергии магнитного поля катушки может иметь место формула, аналогичная выражению для кинетической энергии:

$$W = \frac{LI^2}{2} \quad (3)$$

(тем более, что правая часть данной формулы имеет размерность энергии — проверьте!).

Формула (3) действительно оказывается справедливой. Уметь её выводить пока не обязательно, но если вы знаете, что такое интеграл, то вам не составит труда понять следующие рассуждения.

Пусть в данный момент сила тока через катушку равна  $I$ . Возьмём малый промежуток времени  $dt$ . В течение этого промежутка приращение силы тока равно  $dI$ ; величина  $dt$  считается настолько малой, что  $dI$  много меньше, чем  $I$ .

За время  $dt$  по цепи проходит заряд  $dq = Idt$ . Вихревое электрическое поле совершает при этом отрицательную работу:

$$dA_{\text{вихр}} = \mathcal{E}_i dq = \mathcal{E}_i Idt = -L \frac{dI}{dt} Idt = -LI dI.$$

Источник тока совершает такую же по модулю положительную работу  $dA$  (сопротивлением катушки, напомним, мы пренебрегаем, так что вся работа источника совершается против вихревого поля):

$$dA = -dA_{\text{вихр}} = LI dI.$$

Интегрируя это от нуля до  $I$ , найдем работу источника  $A$ , которая затрачивается на создание тока  $I$ :

$$A = \int_0^I LI dI = \frac{LI^2}{2}.$$

Эта работа превращается в энергию  $W$  магнитного поля созданного тока, и мы приходим к формуле (3).