

## Как работает катушка индуктивности. На примере импульсной схемы с осциллограммой

*«Катушка индуктивности – это устройство, которое может воздействовать на трансцендентальную пространственно-временную субстанцию, называемую магическое магнитное поле, аккумулируя энергию в ней, а состоит всего лишь из нескольких витков блестящей проволоки.»*

Работа катушки индуктивности основана на явлении самоиндукции, описываемое формулой:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

где:  $\mathcal{E}$  – напряжение э.д.с индукции \*,  
 $\Phi$  — полный магнитный поток,  
 $t$  – время

\* Что такое «напряжение э.д.с.» можете прочитать в моей предыдущей статье.

Формула 1 означает, что напряжение э.д.с индукции равно скорости изменения магнитного потока ко времени взятому с обратным знаком. Знак «минус» перед формулой означает, что индукционный ток (и следовательно, э.д.с.) имеет такое направление, что создаваемое им магнитное поле направлено так, чтобы препятствовать изменению магнитного потока (правило Ленца).

О физике явления электромагнитной индукции, откуда берётся это соотношение, порассуждаем в следующих статьях.

Полный магнитный поток обычно пропорционален силе тока, текущего по катушке индуктивности:

$$\Phi = L \cdot I \quad (2)$$

$L$  – коэффициент пропорциональности, называемый для краткости «индуктивность»  
 $I$  – ток, текущий через катушку.

В более общем случае  $L$  может зависеть от  $I$ . В этой статье будем считать,  $L$  – постоянная величина, которая зависит только от формы и геометрии катушки.

Таким образом можем выразить напряжение э.д.с. индукции:

$$\mathcal{E} = -L \cdot \frac{dI}{dt} \quad (3)$$

Давайте теперь посмотрим, как ведёт себя катушка индуктивности при замыкании и размыкании электрической цепи (импульсный режим). Для простоты будем считать, что катушка индуктивности идеальная, её сопротивление постоянному току пренебрежимо мало ( $R=0$ ). Подключим её к источнику постоянного тока на короткое время.

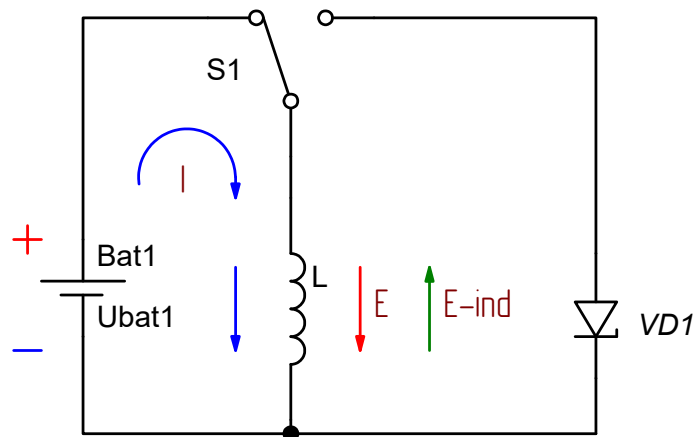


Схема 1

**L** – исследуемая индуктивность

**Bat1** – Источник постоянного тока с напряжением **Ubat1**

**S1** – переключатель

**VD1** – стабилитрон

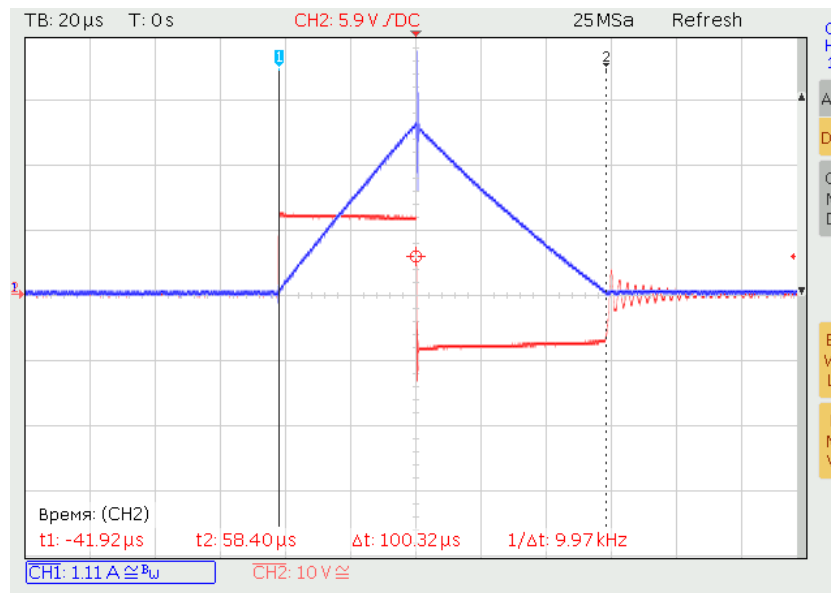
**I** – ток (синяя стрелка)

**E** – напряжённость электрического поля (красная стрелка)

**E-ind** – напряжённость поля сил индукции в катушке (зелёная стрелка)

При подключении катушки индуктивности **L** к источнику тока **Bat1** на ней устанавливается напряжение источника, что приводит к появлению электрического поля внутри проводника катушки с напряжённостью **E** и возникновению тока **I**. Но изменение тока влечёт изменение магнитного поля, а изменение поля вызывает согласно (1) э.д.с. индукции с напряжённостью **E-ind**. Когда **E-ind** и **E** уравниваются, т. е. **E-ind=E** по модулю, а это может быть при равенстве напряжения питания и напряжения э.д.с. индукции **Ubat1=ε** (измеряемое напряжение), то ток в схеме будет линейно нарастать со скоростью **Ubat1/L**, что соответствует левой половине осциллограммы 1 (до середины).

\* Эти рассуждения верны при нашем допущении, что активное сопротивление катушки  $R=0$ . Полностью измеряемое напряжение равно  $U=I \cdot R + \epsilon$ .



Оциллограмма 1. Работа схемы 1 и 2

красный график – напряжение  
синий – ток

В данном примере: Напряжение  $U_{bat1}=12$  вольт,  $t_1=42$  мкс,  $L=180$  мкГн,  $t_2=58$  мкс,  $U_{st}=8.6$  В.

Во второй части осциллограммы переключатель **S1** переключается на стабилитрон **VD1** с напряжением стабилизации  $\sim 8.6$  вольт. (Стабилитрон – это такой полупроводниковый прибор, который начинает пропускать ток с определённого порогового напряжения на нём.) Как изображено на схеме 2:

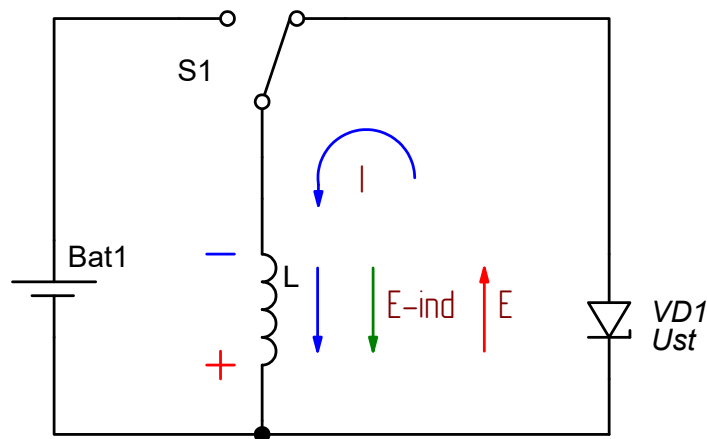
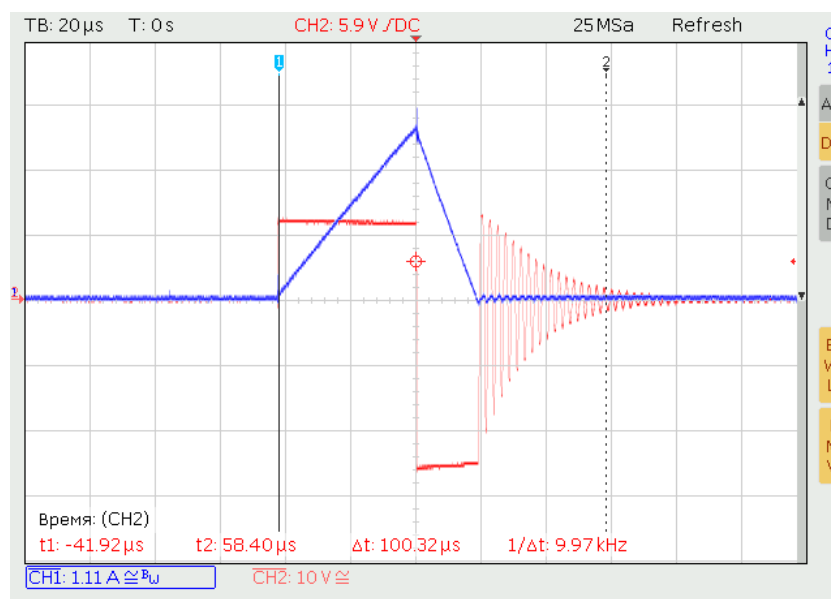


Схема 2

**$U_{st}$**  – напряжение стабилизации стабилитрона

При таком включении ток как бы «по инерции» продолжает течь через индуктивность, в результате индуктивность сама становится источником тока за счёт запасённой в магнитном поле энергии. Напряжение на катушке меняет знак и достигнув порогового напряжения стабилитрона, индуктивность «разряжается» через стабилитрон при  $\mathbf{E}=U_{st}$ . Вместе с напряжением меняют знак и  **$E-ind$**  и  **$E$** . Так как  **$E$**  сменила знак, то и ток теперь уменьшается со скоростью  **$U_{st}/L$** , пока не станет равным нулю. Ток через индуктивность имеет то же направление, что на схеме 1.

При изменении порогового напряжения стабилитрона меняется и скорость уменьшения тока:



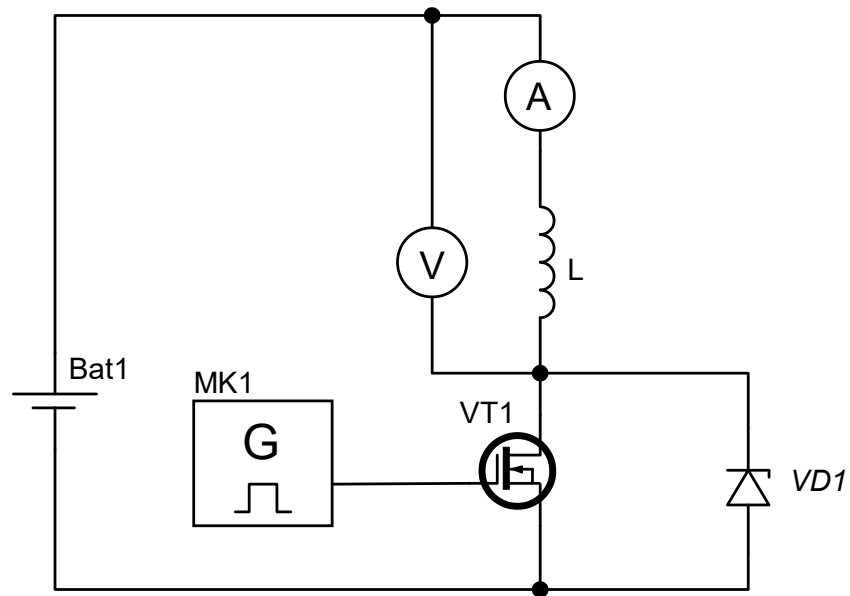
Оциллограмма 2. Работа схемы 1 и 2 при  $U_{ст}=25.5$  вольт.

\* когда энергии становится мало, в схеме происходят затухающие колебания на колебательном контуре из индуктивности и емкости обратного перехода стабилитрона.

Выводы:

1. На примере работы индуктивности в импульсных схемах подтверждено наличие э.д.с. индукции и её зависимость от изменения тока (3). Так явление самоиндукции используется в импульсных преобразователях напряжения – понижающих и повышающих.
2. Во всех случаях э.д.с. индукции противоположна электрическому полю. Можно сравнить её с силами сопротивления, но в отличие сил сопротивления энергия переходит не в тепло, а в энергию магнитного поля. Можно сравнить силы индукции в катушке с сопротивлением тяжёлого маховика к которому необходимо приложить силу, чтобы его разогнать, и силу, чтобы его остановить.
3. Ток в катушке индуктивности стремится сохраниться, потому как стремится сохраниться магнитное поле, с ним связанное.
4. Напряжение э.д.с. индукции так или иначе равно напряжению на катушке индуктивности. (Пока не начнёт играть роль активное сопротивление катушки, которое пока приняли нуль  $R=0$ .)

Схема измерения:



- \* Пороговое напряжение стабилизации VD1 выбирается  $U_{bat} + U_{st}$ .
- \* Полярность сигналов в осциллограммах инвертирована.