

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.11

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПЯХ, СОДЕРЖАЩИХ ИНДУКТИВНОСТЬ И СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРИ КОММУТАЦИИ ИСТОЧНИКА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы

Целью работы является убедиться, что катушка индуктивности обладает способностью накапливать магнитную энергию и экспериментально установить закон изменения силы тока и напряжения на элементах цепи во время протекания переходного процесса, определить их длительность.

Краткая теория

В соответствии с законом Фарадея, при всяком изменении силы тока в проводящем контуре в последнем возникает ЭДС самоиндукции, в результате чего в контуре возникают индуктивные токи, определяющие характер переходного процесса. Применительно к электрическим цепям определим, что переходный процесс это совокупность изменяющихся во времени значений сил токов и напряжений, обуславливающая переход системы в равновесное (установившееся) состояние.

Рассмотрим цепь, содержащую катушку индуктивности L и резисторы $R_{рц}$ и $R_{зц}$ для двух возможных способов коммутации в ней источника постоянного тока E (см. рис.2.11.1).

Переходный процесс при размыкании источника тока

Предположим, что в момент времени $t = 0$ с происходит коммутация (отключение) источника тока. В реальной ситуации сопротивление разомкнутой цепи может изменяться от величины $R_{зц}$, определяемой начальными условиями, до величины $R_{рц}$, когда переключатель K включается в положение 2. Такую ситуацию позволяет смоделировать устройство, принципиальная электрическая схема которого показана на рис.2.11.1.

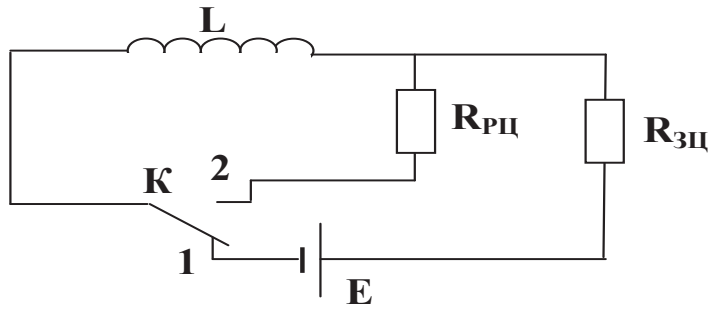


Рис. 2.11.1. Цепь с индуктивностью, сопротивлениями и источником тока

Изменяющаяся во времени сила тока после отключения источника определяет величину ЭДС самоиндукции. Определим силу тока в катушке индуктивности до момента отключения источника тока. Для этого рассмотрим эквивалентную схему, соответствующую стационарному процессу, показанную на рис. 2.11.2. а. Из закона Ома значение силы тока равно: $I_0 = E/R_{зц}, (t = 0)$.

Переходный процесс протекает при условии $t > 0$. Для его описания используем эквивалентную схему, приведённую на рисунке 2.11.2, б. Катушка индуктивности, являющаяся источником ЭДС самоиндукции показана в виде источника тока $E_{сам}$. Как известно законы постоянных токов справедливы для мгновенных значений переменных токов и напряжений, если только изменение силы тока происходит не слишком быстро. Все технические переменные токи являются медленно меняющимися — квазистационарными. Даже очень быстрые электрические колебания, употребляемые в радиотехнике, с частотами порядка миллиона герц, очень часто можно ещё рассматривать как квазистационарные.

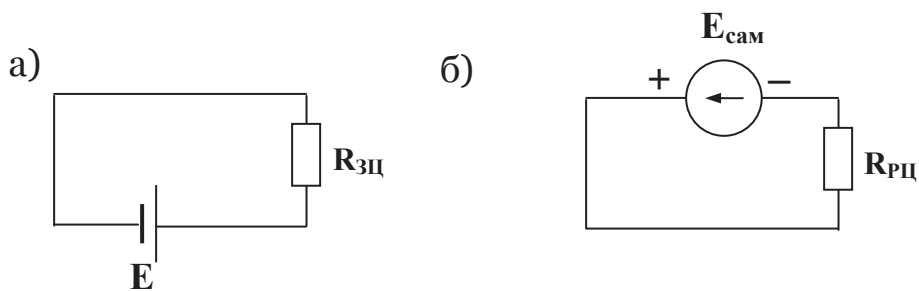


Рис. 2.11.2. Эквивалентные схемы при размыкании цепи

Для цепи, изображённой на рис. 2, б, применив закон Ома и Фарадея, получим

$$I \cdot R_{\text{рц}} = E_{\text{САМ}}, \quad I \cdot R_{\text{рц}} = -L \cdot \frac{dI}{dt} \quad (2.11.1)$$

Полученное однородное дифференциальное уравнение совместно с начальными условиями позволяет записать решение относительно силы тока $I(t)$ в виде:

$$I(t) = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (2.11.2)$$

где $\tau = L/R_{\text{рц}}$ называется постоянной времени цепи — характерное время, определяющее скорость переходного процесса. Вид этой зависимости показан на рис. 2.11.3. Протекание тока связано с совершением работы. Наличие тока после отключения источника тока от цепи говорит о том, что катушка индуктивности обладает запасом магнитной энергии.

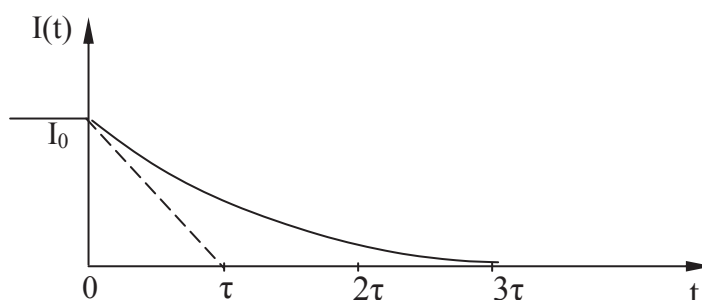


Рис. 2.11.3. Переходный процесс при размыкании цепи

На практике считается, что переходный процесс закончился, если изменение физической величины (в нашем случае силы тока) отличается от его максимального значения не более чем на 5%. Расчёт показывает, что время переходного процесса округлённо равно 3τ .

Из полученного результата следует, что процесс превращения запасённой магнитной энергии катушки индуктивности в тепловую происходит тем быстрее, чем больше величина сопротивления разомкнутой цепи $R_{\text{рц}}$. В отсутствии потерь в цепи, т.е. при $R_{\text{рц}} = 0$ электрический ток в ней будет протекать бесконечно долго.

Определим модуль ЭДС самоиндукции

$$E_{САМ} = -L \cdot \frac{dI}{dt} = I_0 \cdot L \cdot \frac{R_{PII}}{L} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) = E \frac{R_{PII}}{R_{ЗЦ}} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (2.11.3)$$

Для момента времени $t = 0$ получим

$$E_{САМ} = E \cdot \frac{R_{PII}}{R_{ЗЦ}} \quad (2.11.4)$$

Из (2.11.4) следует, что при разрыве цепи ($R_{PII} \rightarrow \infty$) ток проводимости отсутствует и величина ЭДС самоиндукции достигает больших значений.

Переходный процесс при замыкании источника тока

Предположим теперь, что в момент времени $t = 0$ мы переключаем **К** из положения **2** в положение **1** (рис.2.11.1). Соответствующие эквивалентные электрические схемы до переключения и после переключения приведены на рис.2.11.4. До переключения цепь разомкнута, и ток проводимости отсутствует $I = 0$ (рис.2.11.4.а). После переключения цепь замыкается, начинает течь ток, при этом эквивалентная схема будет содержать два источника тока (рис.2.11.4.б).

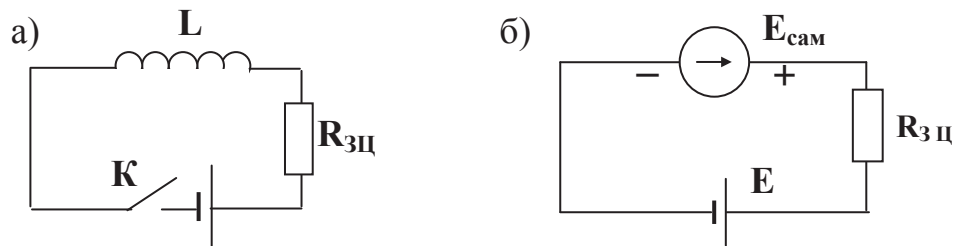


Рис. 2.11.4. Эквивалентные схемы при замыкании цепи

ЭДС первого создаётся источником постоянного тока E , ЭДС второго источника тока $E_{сам}$ возникает за счёт появления в катушке изменяющегося во времени тока и, в соответствии с законом Фарадея, является электродвижущей силой самоиндукции.

Применим второе правило Кирхгофа, связывающее мгновенные значения параметров электрической цепи при $t > 0$, к схеме, изображённой на рис.2.11.4.б

$$I \cdot R_{\text{ц}} = E - L \cdot \frac{dI}{dt} \quad (2.11.5)$$

Это соотношение представляет собой неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка относительно силы тока $I(t)$. Совместно с начальными условиями решение этого уравнения определяет функциональную зависимость силы тока от времени

$$I(t) = \frac{E}{R_{\text{ц}}} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \quad (2.11.6)$$

где $\tau = L/R_{\text{ц}}$. График этой зависимости приведён на рис.2.11.5.

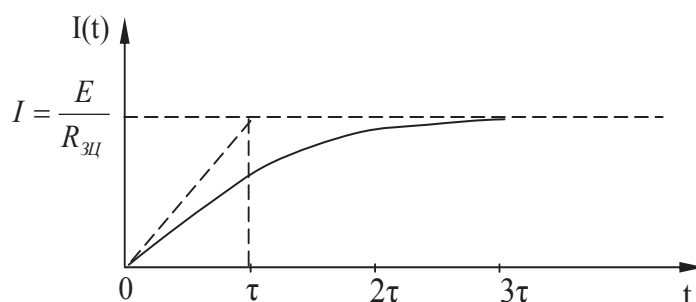


Рис. 2.11.5. Переходный процесс при замыкании цепи

Результаты анализа переходных процессов, возникающих как при размыкании, так и при замыкании источника тока в электрической цепи, содержащей индуктивность и сопротивление, показывают, что сила тока в ней не может мгновенно достигать стационарного (установившегося) значения. В этот промежуток времени катушка индуктивности накапливает магнитную энергию.

Выполнение работы

Экспериментальная установка

На рис. 2.11.6 приведена схема экспериментальной установки, которая включает в себя исследуемые элементы электрической цепи, смонтированные в лабораторном стенде, двухканальный осциллограф, используемый как контрольно-измерительный прибор, и генератор сигналов, осуществляющий коммутацию источника тока через устройство управления ключом. Для измерения активных составляющих сопротивлений имеется комбинированный прибор **В7—16А**.

Экспериментальная установка, собранная по схеме, показанной на рис.2.11.6, позволяет по осциллограмме изменения напряжения на резисторе R_2 , подаваемого на второй канал осциллографа, контролировать изменение силы тока в цепи, содержащей катушку индуктивности, как при размыкании, так и при замыкании источника постоянного тока, а по осциллограмме первого канала - суммарное напряжение на зажимах катушки индуктивности и резисто-

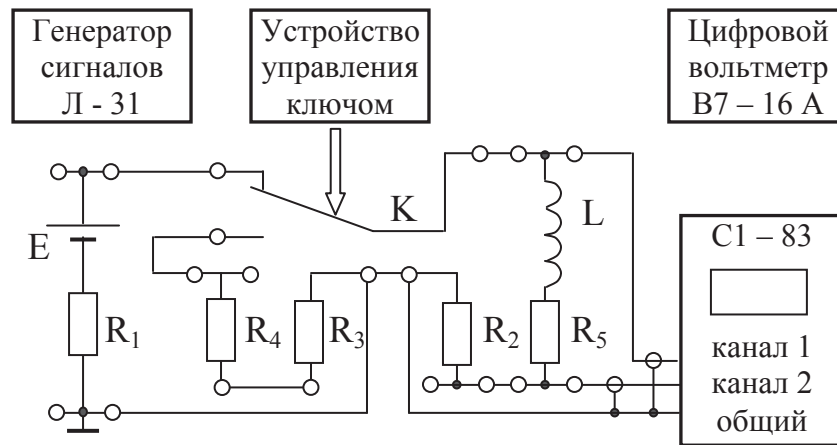


Рис.2.11.6. Схема экспериментальной установки

ре R_2 . В таблице это напряжение для момента размыкания цепи обозначено как U_{max} . Величина сопротивления R_2 мала, поэтому можно записать приближённое равенство $U_{max} \approx E_{сам}$.

У осциллографа первый и второй каналы имеют объединённые общие (не сигнальные или называемые ещё «земляными») входы, поэтому достаточно подключить к месту соединения резисторов R_2 и R_3 только одну из «земляных» вилок входных кабелей.

Порядок выполнения работы

Включите комбинированный прибор **В7—16А** и подготовьте его к работе для измерения величин сопротивлений резисторов R_2 , R_3 , R_4 и катушки R_5 . Измерьте их значения и запишите в таблицу 2.11.1. Внутреннее сопротивление источника тока R_1 считать равным 50 Ом.

Соберите установку в соответствии со схемой на рис. 2.11.6. Установите минимально возможное сопротивление замкнутой цепи $R_{зц} = R_1 + R_2 + R_5$. Сопротивление разомкнутой цепи в этом случае согласно условиям проведения первого эксперимента (см.

табл.2.11.1) равно $R_{pц} = R_2 + R_3 + R_4 + R_5$. Включите осциллограф и подготовьте его к работе для наблюдения двух сигналов в режиме внутренней синхронизации. Включите стенд. Включите генератор сигналов Л-31. Установите такое значение частоты колебаний выходного сигнала генератора, управляющего коммутацией цепи, и переключателя длительности развёртки осциллографа, при которых переходные процессы наблюдались бы полностью как при размыкании, так и при замыкании источника тока. По шкале переключателя длительности развёртки осциллографа определите цену деления по оси времени и запишите её в таблицу приборов. В дальнейшем длительность развёртки осциллографа изменять не следует.

Соблюдая масштаб, перерисуйте осциллограмму переходных процессов в тетрадь или миллиметровую бумагу.

По осциллограммам определите длительности переходных процессов и максимальные значения напряжения на зажимах катушки индуктивности в момент коммутации U_{max} . Полученные значения запишите в таблицу 2.11.1.

Исследования повторите ещё дважды для других условий эксперимента. При этом с помощью проводников, переключая на лабораторном стенде резисторы электрической цепи схемы, поставьте новые условия протекания переходных процессов, которые отражены в таблице 2.11.1.

Таблица 2.11.1

Результаты измерений и расчётов

N	$R_{зц}$, Ом	$t_{зц}$, мс	$t_{зц}$, мс	L, Гн	$R_{pц}$, Ом	$t_{pц}$, мс	$t_{pц}$, мс	L, Гн	U_{max} , В
1	$R_1 + R_2 + R_5 =$				$R_2 + R_3 + R_4 + R_5 =$				
2	$R_1 + R_2 + R_5 =$				$R_2 + R_5 =$				
3	$R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 =$				$R_4 + R_3 + R_2 + R_5 =$				
$R_1 = 50 \text{ Ом};$		$R_2 =$;	$R_3 =$;	$R_4 =$;	$R_5 =$	
$=$									
$L_{cp} =$		Гн;	$\Delta L =$	Гн;	$L = (L_{cp} \pm \Delta L) \text{ Гн}$				

По результатам измерений рассчитайте значения постоянных времени для разомкнутой $\tau_{pц}$ и замкнутой $\tau_{зц}$ цепей соответственно при их размыкании и замыкании. Затем рассчитайте шесть значе-

ний величины индуктивности цепи, по которым определите её среднее значение и погрешность измерения. Результаты расчётов запишите в таблицу 2.11.1.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение переходного процесса, протекающего при замыкании или размыкании цепи с индуктивностью и сопротивлением.
2. Как определяется характерное время переходного процесса?
3. Нарисуйте графики зависимости силы тока от времени при размыкании и замыкании цепи.
4. Сформулируйте и поясните закон индукции Фарадея.
5. Запишите первое и второе правило Кирхгофа.
6. Расскажите порядок выполнения работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2. — М.: Наука, 1978, 480 с.
2. Калашников С.Г. Электричество. Общий курс физики. — М.: Наука, 1985. — 576 с.