

# ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛИНЕЙНОЙ $RL$ -ЦЕПИ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

Цель работы:

- исследовать переходные процессы в линейной  $RL$ -цепи при подключении к источнику постоянного напряжения;
- установить влияние параметров исследуемой цепи на характер переходного процесса;
- исследовать и измерить параметры переходного процесса помощью электронного осциллографа.

## Краткая теория

Определение токов и напряжений переходных процессов в цепях с индуктивностью имеет особенно большое практическое значение, так как при размыкании индуктивности, через которую протекает ток, на её полюсах за счет ЭДС самоиндукции возникает напряжение, стремящееся к бесконечно большому значению. ЭДС самоиндукции может во много раз превысить напряжение источников питания и, суммируясь с ним, послужить причиной возникновения *коммутационных* перенапряжений в электрических цепях. Коммутационные перенапряжения являются опасными для обмоток электродвигателей, генераторов и трансформаторов, так как могут вызвать пробой их изоляции. Кроме того, перенапряжения способствуют возникновению электрической искры или дуги в аппаратах, осуществляющих коммутацию электрических цепей. Дуга оплавляет размыкающие контакты и приводит к быстрому выходу таких аппаратов из строя.

Определение токов и напряжений переходных процессов в цепях с индуктивностью опирается на тот же теоретический аппарат и проводится аналогично определению параметров переходных процессов в цепях с емкостью (см. лабораторную работу 6). Проведем определение переходного тока и напряжения классическим методом для последовательной цепи, состоящей из резистора  $R$ , катушки индуктивности  $L$  и источника постоянного напряжения

$E$  с напряжением  $U_0$  (рис. 7.1). Коммутация в цепи осуществляется с помощью ключа  $S$ .

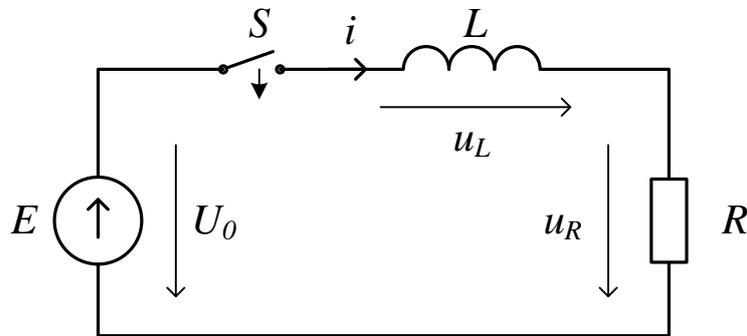


Рис. 7.1. Схема для расчета переходного тока и напряжения при подключении последовательной  $RL$ -цепи к источнику напряжения:  $E$  – источник постоянного напряжения;  $S$  – ключ;  $R$  – резистор;  $L$  – катушка индуктивности

Анализ переходных процессов начнем с составления по I закону Кирхгофа уравнения равновесия цепи после коммутации, т. е. при замкнутом ключе  $S$ :

$$U_0 = u_R + u_L = iR + u_L. \quad (7.1)$$

С учетом (6.4) исключим напряжение и сведем выражение к уравнению относительно тока  $i$ :

$$L \frac{di}{dt} + Ri = U_0. \quad (7.2)$$

Запишем общее решение уравнения в виде суммы вынужденной и свободной составляющих:

$$i = i_{св} + i_{вын}. \quad (7.3)$$

Свободную составляющую определим из однородного дифференциального уравнения:

$$L \frac{di}{dt} + Ri = 0. \quad (7.4)$$

Характеристическое уравнение  $Lp + R = 0$  имеет корень

$$p = -R/L, \quad (7.5)$$

поэтому общее решение однородного уравнения будет иметь вид

$$i_{св} = Ae^{-t/\tau}, \quad (7.6)$$

где  $\tau = L/R$  — постоянная времени резистивно-индуктивной цепи.

Вид частного решения  $i_{св}$  зависит от характера напряжения источника.

При подключении к источнику постоянного напряжения при  $t \rightarrow \infty$  в цепи устанавливается постоянный ток, падение напряжения на индуктивности становится равным нулю, и все напряжение источника приложено к резистору. Поэтому вынужденный ток будет равным  $i_{вын} = U_0/R$ . Далее для определения значений постоянной  $A$  подставим  $i_{св}$  и  $i_{вын}$  в (7.3):

$$i = Ae^{-t/\tau} + \frac{U_0}{R}. \quad (7.7)$$

Применим закон коммутации — условие непрерывности тока в индуктивном элементе в момент коммутации. Так как до замыкания  $i(t_-) = 0$ , то

$$i(t_+) = A + \frac{U_0}{R} = i(t_-) = 0, \quad (7.8)$$

откуда следует, что  $A = -U_0/R$ . Теперь мы можем получить окончательные выражения для тока цепи и напряжения на индуктивности:

$$i = \frac{U_0}{R} (1 - e^{-t/\tau}); \quad (7.9)$$

$$U_L = U_0 e^{-t/\tau}. \quad (7.10)$$

Характер зависимостей тока и напряжения на катушке индуктивности от времени (рис. 7.2) аналогичен кривым для  $u_C(t)$  и  $i(t)$  в  $RC$ -цепи (рис. 6.2).

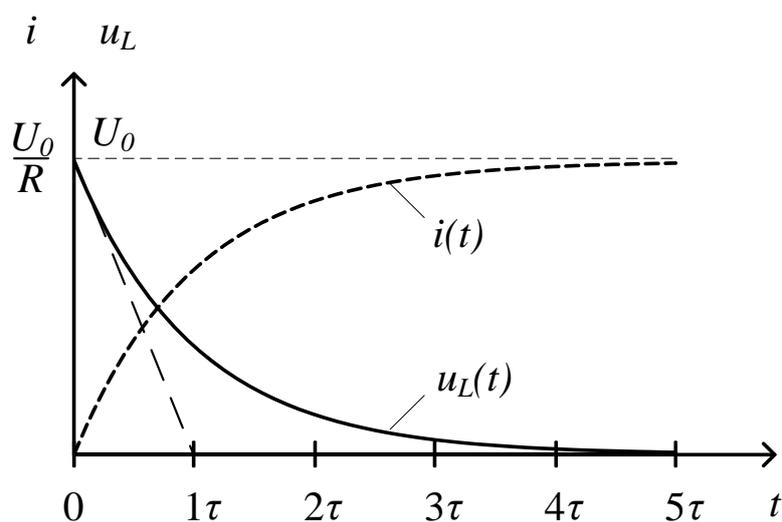


Рис. 7.2. Зависимости изменения тока и напряжения от времени при подключении  $RL$ -цепи к источнику постоянного напряжения

Рассмотрим случай замыкания  $RL$ -цепи, в которой ранее протекал ток  $I_0 = U_0/R$ , на некоторое сопротивление  $R_0$  (рис. 7.3).

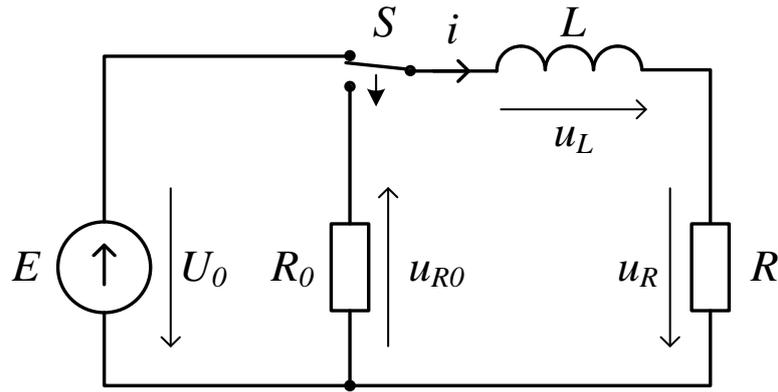


Рис. 7.3. Схема для расчета переходного тока и напряжения при переключении последовательной  $RL$ -цепи от источника напряжения на замыкающую цепь:  $E$  – источник постоянного напряжения;  $S$  – ключ;  $R$  – резистор;  $L$  – катушка индуктивности;  $R_0$  – резистор цепи замыкания

Переходные процессы при замыкании  $RL$ -цепи описываются однородным уравнением (7.4), поэтому общее решение уравнения для тока в цепи имеет лишь свободную составляющую

$$i_{св} = i(t) = A e^{-t/\tau}. \quad (7.11)$$

Из начального условия имеем  $i(0) = I_0 = A$ , поэтому окончательно

$$i(t) = I_0 e^{-t/\tau}, \quad (7.12)$$

где  $\tau = L/(R + R_0)$  – постоянная времени резистивно-индуктивной цепи.

Тогда напряжение на катушке индуктивности равно

$$u_L = L \frac{di}{dt} = -(R + R_0)I_0 e^{-t/\tau}. \quad (7.13)$$

Соответствующие кривые изображены на рис. 7.4. Ток после замыкания катушки сохраняет свое направление, а напряжение на индуктивности скачком меняет знак, принимая в момент коммутации значение  $-I_0(R + R_0)$ , после чего спадает по экспоненте.

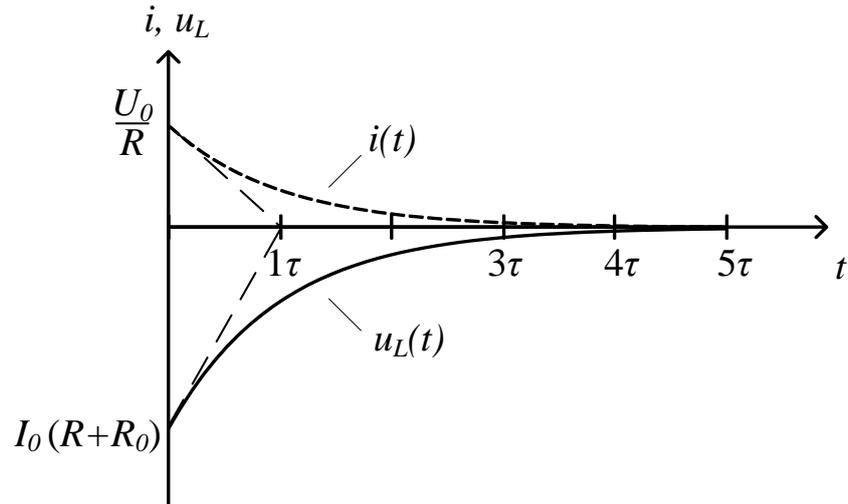


Рис. 7.4. Зависимости изменения тока и напряжения на индуктивности от времени при переключении последовательной  $RL$ -цепи от источника напряжения на замыкающую цепь

При большом значении сопротивления цепи разряда начальный скачок может вызвать коммутационное перенапряжение на элементах цепи. Так, если замыкающая ветвь сама имеет большое значение сопротивления  $R_0 \gg R$ , модуль начального напряжения возрастет до значения  $I_0(R + R_0)$ , что может привести к повреждению элементов цепи. При  $R_0 \rightarrow \infty$  (при разрыве цепи) напряжение на индуктивности после коммутации также стремится к бесконечности.

## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Измерение постоянной времени  $\tau$  и напряжения на резисторе при подключении  $RL$ -цепи к источнику постоянного напряжения.

1.1. Соберите схему для измерения параметров переходного процесса и постоянной времени  $\tau$   $RL$ -цепи, приведенную на рис. 7.5.

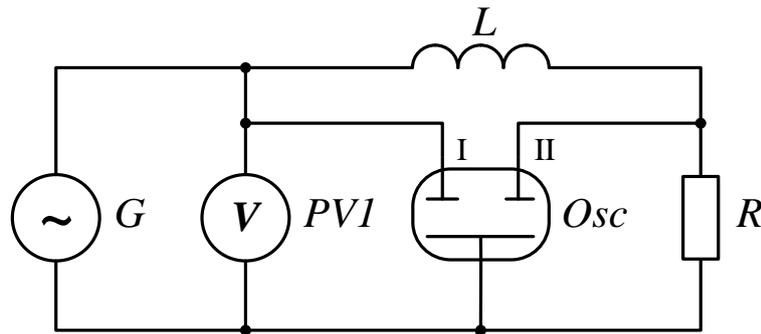


Рис. 7.5. Схема для измерения параметров переходного процесса и постоянной времени  $\tau$   $RL$ -цепи:  $G$  – генератор сигналов прямоугольной формы;  $PV1$  – вольтметр;  $L$  – катушка индуктивности;  $R$  – резистор;  $Osc$  – осциллограф

Как и в предыдущей лабораторной работе, для моделирования коммутационного процесса используется выходное напряжение генератора импульсов прямоугольной формы. Длительность импульсов генератора выбирается так, чтобы время переходного процесса было много меньше длительности импульса. Для этого необходимо установить длительность импульса генератора  $G$  таким образом, чтобы время нарастания сигнала на резисторе  $R$  от уровня 0,1 до уровня 0,9 от амплитуды входного прямоугольного импульса (длительность переднего фронта  $\tau_f$  импульса на резисторе) было на порядок меньше длительности самого импульса  $\tau_{и}$ .

При  $\tau_f \ll \tau_{и}$  источник напряжения в виде генератора  $G$  можно считать постоянным. Переходный процесс наблюдается в цепи от момента подачи прямоугольного импульса на вход цепи и до достижения напряжением на резисторе амплитудного значения входного импульса.

1.2. Рассчитайте постоянную времени цепи  $\tau$  по номиналам полученных от преподавателя резистора и конденсатора. Установите на генераторе импульсов амплитуду прямоугольных импульсов  $U_0 = 1$  В, период следования импульсов  $T = 10 \tau$ . Синхронизируйте вход канала I осциллографа от генератора импульсов, добейтесь устойчивого изображения сигнала. Оцените длительность переднего фронта  $\tau_f$  импульса на катушке индуктивности с помощью канала II осциллографа, при необходимости откорректируйте длительность импульса.

Зарисуйте с экрана осциллографа осциллограммы входного прямоугольного импульса  $U_0(t)$  и напряжения  $u_R$ , укажите масштабы по осям. Отметьте на осциллограммах параметры импульсов на выходе  $RL$ -цепи: период  $T$ , амплитуду  $A$ , длительность фронта выходного импульса  $\tau_\phi$  (рис. 6.6).

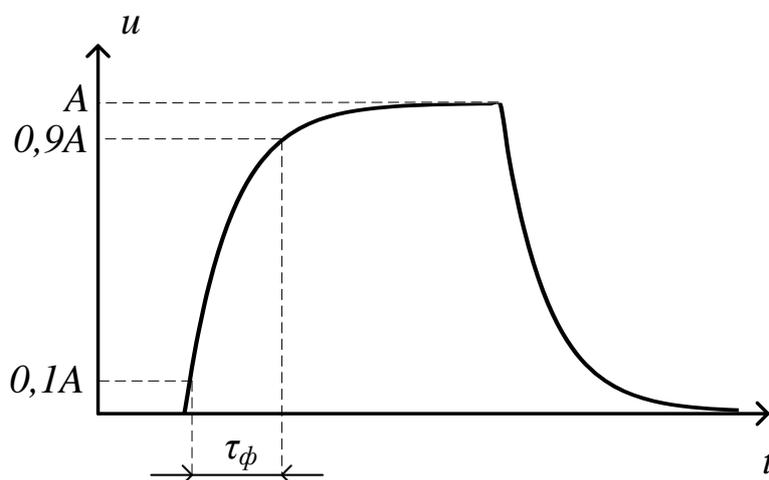


Рис. 7.6. Измеряемые параметры импульсов на резисторе  $RL$ -цепи

Сравните измеренное значение длительности фронта  $\tau_{\phiи}$  с определенным по формуле

$$\tau_\phi = 2,2 L/R. \quad (7.14)$$

1.3. Замените резистор на другой, с меньшим сопротивлением. Повторите опыт п. 1.2, зарисуйте соответствующие осциллограммы, отметьте на них параметры импульсов на входе и выходе цепи.

2. Измерение постоянной времени  $\tau$  и напряжения на резисторе при разряде катушки индуктивности на резистор.

2.1. Поменяйте местами катушку индуктивности  $L$  и резистор  $R$  в схеме, приведенной на рис. 7.5. В данном задании переходным процессом будет разряд катушки индуктивности на резистор, поэтому в нем проводятся измерения параметров не фронта, а *среза* импульса (рис.7.7).

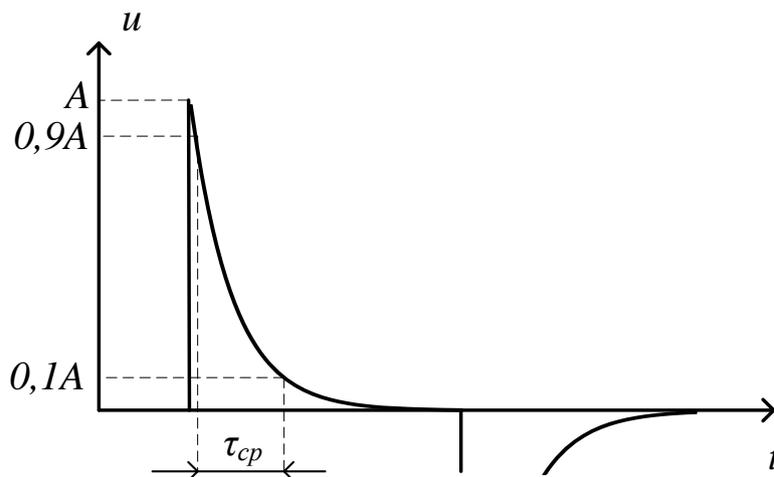


Рис. 7.7. Измерение длительности среза импульса на катушке индуктивности  $RL$ -цепи

2.2. По алгоритму п. 1 практического задания с учетом п. 2.1 исследуйте переходные процессы в цепи при двух различных номиналах резисторов.

### Содержание отчета

1. Принципиальные схемы лабораторных установок для изучения переходных процессов в  $RL$ -цепи.

2. Для каждого из вариантов соединений  $R$  и  $L$  и номиналов резисторов  $R$ :

- расчетное значение  $\tau$ ;
- осциллограммы входного и выходного напряжений с указанием масштабов по осям;
- значения периода  $T$ , амплитуды  $A$ , длительность входного импульса  $\tau_{и}$  и длительность фронта выходного  $\tau_{фи}$  импульса.

3. Выводы на основе анализа результатов расчета и эксперимента.

### Контрольные вопросы

1. Что происходит при размыкании индуктивности, через которую протекает ток?

2. Что является причиной возникновения коммутационных перенапряжений в электрических цепях?

3. Чем опасны коммутационные перенапряжения в электрических цепях?

4. Как определить независимые и зависимые начальные условия при подключении последовательной  $RL$ -цепи к источнику напряжения?

5. Как определить вынужденные величины при подключении последовательной  $RL$ -цепи к источнику напряжения?

6. Как определить независимые и зависимые начальные условия при переключении последовательной  $RL$ -цепи от источника напряжения на замыкающую цепь?

7. Как определить вынужденные величины при переключении последовательной  $RL$ -цепи от источника напряжения на замыкающую цепь?

8. Как определить постоянные интегрирования при подключении последовательной  $RL$ -цепи к источнику напряжения?

9. Как определить постоянные интегрирования при переключении последовательной  $RL$ -цепи от источника напряжения на замыкающую цепь?

10. Чему равна постоянная времени последовательной  $RL$ -цепи при её подключении к источнику напряжения?

11. Чему равна постоянная времени последовательной  $RL$ -цепи при её переключении от источника напряжения на замыкающую цепь?

12. Как вывести формулу для длительности фронта (среза) импульса при коммутационных процессах в последовательной  $RL$ -цепи?

### Рекомендуемая литература

Попов В.П. Основы теории цепей. М.: Юрайт, 2017.

Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Юрайт, 2017.

Грахов П.А., Гусаров А.В., Крайнова Т.М., Лукманов В.С.,

Медведева Л.С., Чечулина И.Е. Исследование электрических цепей: лабораторный практикум по дисциплине «Теоретические основы электротехники». Уфа: Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2007.