

## Лабораторная работа

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПЯХ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо:

- а) получить допуск к выполнению лр на этапе моделирования переходных процессов в мультисиме.
- б) получить допуск к выполнению лр на стенде ni elvis 2 .
  - Для этого необходимо:
  - прочитать по учебнику теоретические сведения
  - изучить описание работы
  - выполнить предварительный расчет и заготовить проект к пояснительной записки
  - ответить на вопросы и тестовые задачи

**Цель работы:** изучить переходные процессы в цепях первого порядка при подключении линейной электрической цепи к источнику постоянного напряжения, и генератора прямоугольных импульсов.

#### Теоретические сведения

##### Подключение цепи с $RL$ -элементами к источнику постоянного напряжения

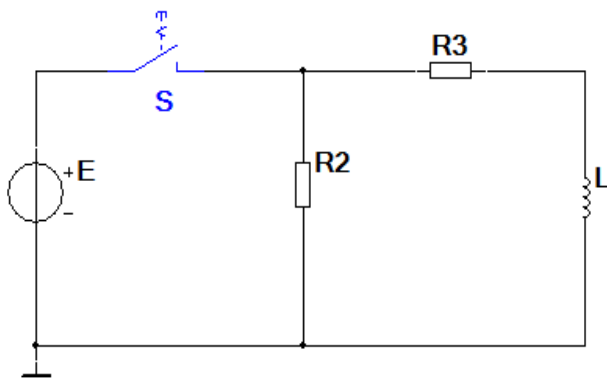


Рисунок 1. Резистивно-индуктивная цепь

Для электрической цепи составим систему уравнений:

$$\begin{cases} I_1 = I_2 + I_3; \\ U_L + I_3 R_3 = E; \\ I_2 R_2 = R; \end{cases}$$

Электрический ток второй ветви равен  $I_2 = E/R_2$ ;

Для вычисления тока в третьей ветви необходимо решить дифференциальное уравнение первого порядка:

$$L \frac{di_3}{dt} + R_3 i_3 = E;$$

Электрический ток определяется в виде суммы двух составляющих:  $i_3(t) = i_{np} + i_{св}$ ;

Здесь  $i_{np}$  — принужденный ток и  $i_{св}$  — свободный ток

$$\text{Постоянная времени } \tau = \frac{L}{R_3} = -\frac{1}{p}$$

Свободный ток равен  $i_{св} = A e^{\frac{t}{\tau}} = A e^{pt}$ ; Принужденный ток равен  $i_{np} = \frac{E}{R_3}$ ;

Итого получаем значение тока в третьей ветви из решения дифференциального уравнения

$$i_3(t) = \frac{E}{R_3} + A e^{pt};$$

Используя законы коммутации, найдем постоянную интегрирования:

$$i_L(0-) = i_L(0+) = 0$$

Тогда получим  $i_L(0+) = \frac{E}{R_3} + Ae^0 = 0$  Находим:  $A = -\frac{E}{R_3}$ ;

Следовательно получаем уравнение тока для индуктивности  $i_3(t) = \frac{E}{R_3}(1 - e^{pt})$ ;

Определим напряжение на индуктивности  $U_L(t) = L \frac{di_3}{dt} = \frac{E}{R_3} L \frac{R_3}{L} e^{pt} = E e^{pt}$

### **Отключение цепи с RL-элементами от источника постоянного напряжения**

Запишем дифференциальное уравнение при отключении индуктивности на разрядное сопротивление  $R_2$

$$L \frac{di}{dt} + (R_3 + R_2)i = 0;$$

Решение дифференциального уравнения будет состоять только из свободного затухающего тока  $i(t) = i_{ce} = Ae^{pt}$ ;

Определим постоянную интегрирования:

$$i_L(0-) = i_L(0+) = \frac{E}{R_3} = Ae^0; \text{ получаем } A = \frac{E}{R_3};$$

Уравнение переходного процесса электрического тока определяется по формуле

$$i(t) = \frac{E}{R_3} e^{pt}; \text{ . Постоянная по времени равна } \tau = -\frac{1}{p} = \frac{L}{(R_3 + R_2)};$$

Напряжение на индуктивности можно определить по формуле

$$U_L(t) = L \frac{di}{dt} = \frac{E}{R_3} L p e^{pt} = \frac{E}{R_3} L \frac{R_3 + R_2}{L} e^{pt} = E \frac{R_3 + R_2}{R} e^{pt}$$

### **Моделирование в среде Multisim**

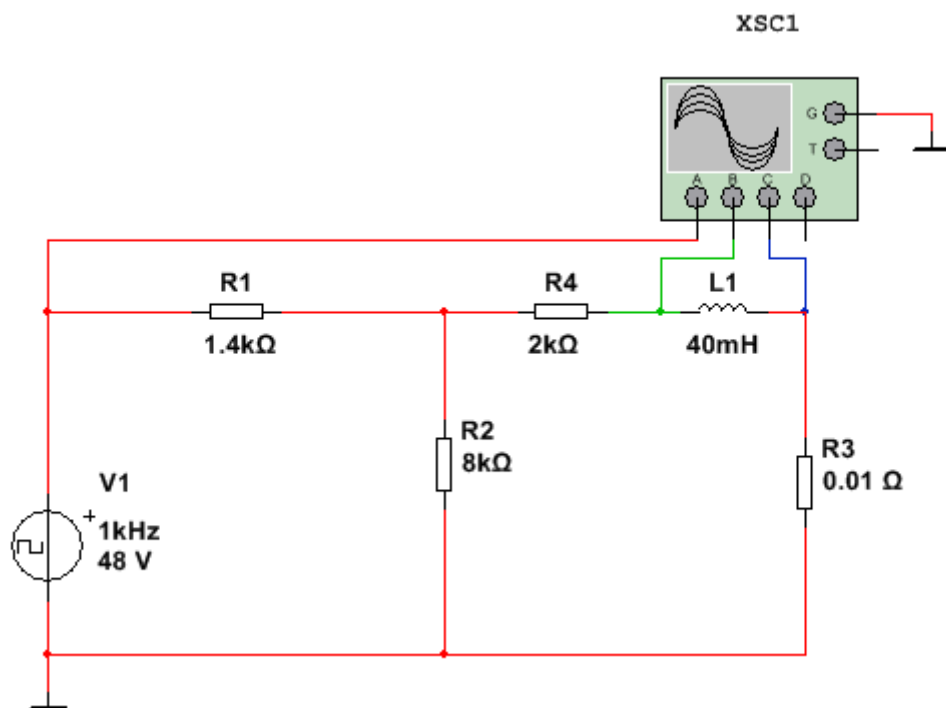
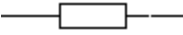
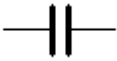
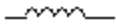

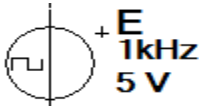
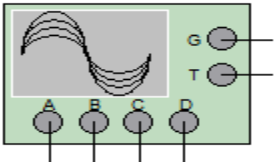
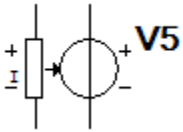
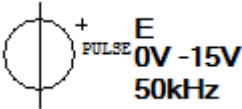


Рисунок 2: ПЭС для моделирования в Multisim

Нужные нам компоненты:

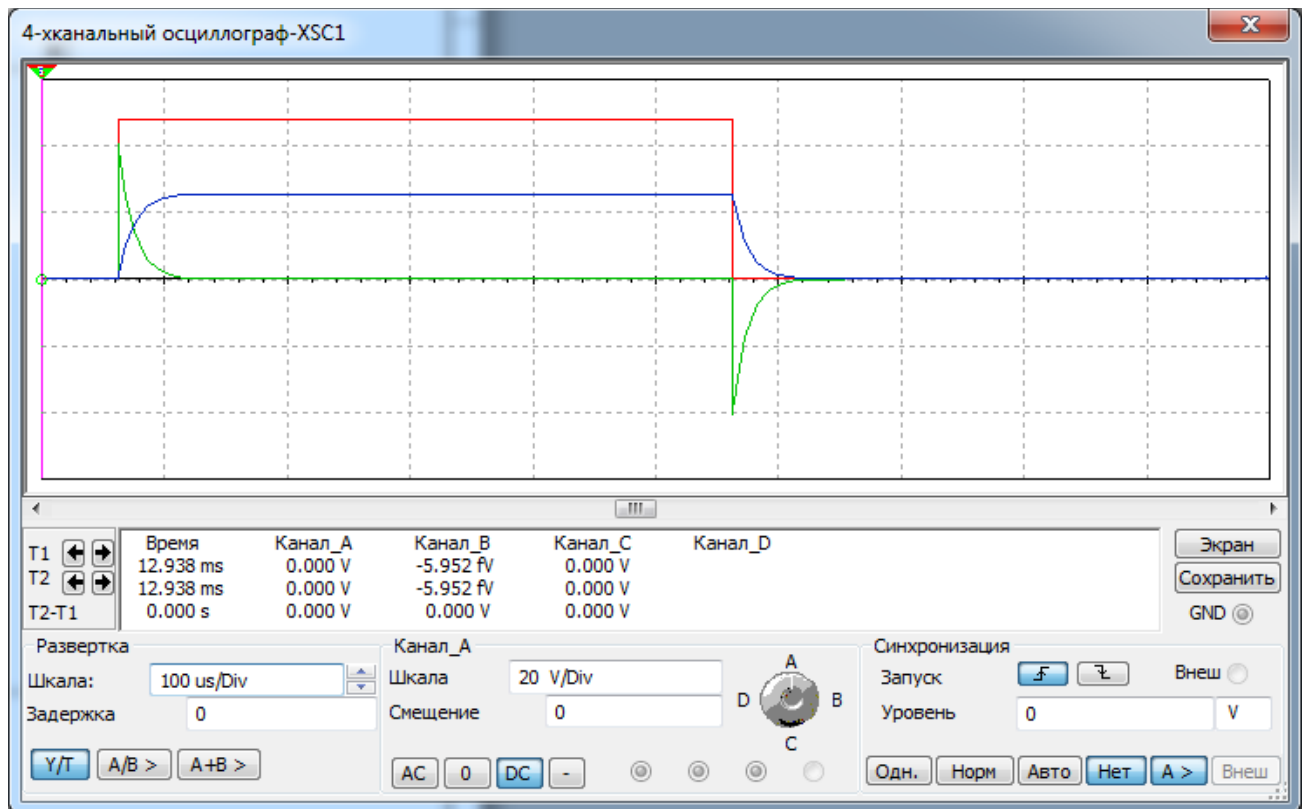
Путь к компоненту Вставить → Компонент	Условные обозначения
Раздел Basic→Семейство Resistor →Выбираем нужный	
Раздел Basic→Семейство Capacitor →Выбираем нужный	
Раздел Basic→Семейство Inductor →Выбираем нужный	
Раздел Source→Семейство Power Source →Выбираем Ground	
Раздел Source→Семейство Signal Voltage Source →Выбираем Clock Voltage	
Моделирование→Приборы→4-х канальный осциллограф	
Раздел Source→Controlled Voltage Sources →Выбираем Current Controlled Voltage Source	
Раздел Source →Signal Voltage Sources → Выбираем Bipolar Voltage	

*По результатам моделирования заполняем таблицу.*

Наименование параметра	Значение параметра во время действия t					
	Импульса мкс			Паузы мкс		
	0	5	10	0	5	10
$I_L(t)$						
$U_L(t)$						

**Варианты заданий для  $RL$ -цепи**

Вариант	Е , В	$R_1$ , кОм	$R_2$ , кОм	$R_3$ , Ом	$R_4$ ,кОм	L , мГн
1	48	1.4	8	0.01	2	60
2	48	1.6	12	0.01	3	40
3	48	2.5	15	0.01	3	40
4	48	0.8	16	0.01	4	40
5	48	1	20	0.01	5	60
6	36	1.4	8	0.01	2	60
7	36	0.6	12	0.01	3	40
8	50	2.5	15	0.01	3	40
9	50	1.8	16	0.01	4	40
10	50	1	18	0.01	4.5	40
11	36	2	9	0.01	3	60
12	36	1.2	12	0.01	4	72
13	36	2.5	15	0.01	5	72
14	36	1.2	16	0.01	3.2	50
15	48	2	18	0.01	6	72
16	36	2	20	0.01	8	60
17	36	0.6	10	0.01	2.5	60
18	36	0.4	9	0.01	3	40
19	24	1.2	8	0.01	3.2	80
20	24	1	6	0.01	1.5	40
21	24	1.5	9.6	0.01	2.4	40
22	24	1.3	10	0.01	2.5	50
23	24	1.5	12	0.01	4	40
24	24	1.6	14	0.01	3.5	40
25	36	0.4	9	0.01	3	80

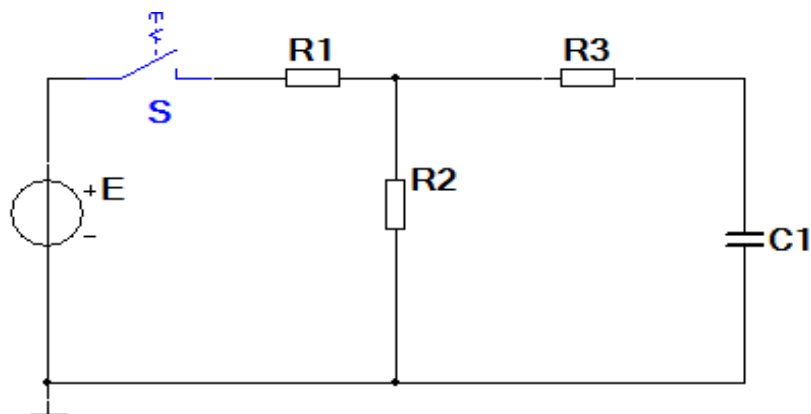


### *Переходные процессы в цепях с RC-элементами*

При подключении резистивно-емкостной цепи без начального запаса энергии к источнику постоянного напряжения с ЭДС  $E$  напряжение на конденсаторе  $U_C$  изменяется по экспоненциальному закону, ток  $i$  нарастает, а убывает по экспоненте.

Алгоритм решения задач сводится к следующему:

- составляют систему уравнений в интегральной или дифференциальной форме по законам Кирхгофа.
- методом замены переменных получают дифференциальное уравнение первого порядка, если в цепи один накопитель, а затем его решают



*Рисунок 3: Резистивно-емкостная цепь*

Составим систему уравнений для электрической цепи (см рисунок 4)

$$\begin{cases} E = I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2; \\ U_C + I_3 \cdot R_3 - I_2 \cdot R_2 = 0; \\ I_1 - I_2 - I_3 = 0. \end{cases}$$

Заменяя переменные, получим следующие уравнения:

$$\begin{cases} i_3 R_1 + i_3 (R_1 + R_2) = E; \\ i_2 = \frac{E}{(R_1 + R_2)} - i_3 \frac{R_1}{R_1 + R_2}; \\ U_C + i_3 (R_3 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}) = E \frac{R_3}{R_1 + R_2}. \end{cases}$$

Во второй ветви ток проходит через конденсатор и определяется дифференциальной зависимостью между током и напряжением:  $i_3 = C \frac{dU_C}{dt}$

Получив дифференциальное уравнение первого порядка с разделяющимися переменными:

$$C \cdot R_{\text{экв}} \cdot \frac{dU}{dt} + U_C = E \frac{E}{R_1 + R_2} \quad \text{Здесь } R_{\text{экв}} = R_3 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}; \tau = CR_{\text{экв}}$$

Решение дифференциального уравнения как общее (правая часть равняется нулю), так и частичное, найдем, зная функцию правой части. Разделение на две составляющие напряжения на конденсаторе исходит только из математического решения дифференциального уравнения:

$$U_C(t) = U_{Cnn} + U_{Ccc};$$

При подключении резистивно-емкостной цепи без начального запаса энергии к источнику постоянного напряжения с ЭДС  $E$  (рисунок 4) напряжение на конденсаторе  $U_C$  изменяется по экспоненциальному закону, ток  $i$  нарастает, а убывает по экспоненте:

$$U_C(t) = E(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad i(t) = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad \text{при } t > 0$$

Постоянной времени цепи называют время, в течение которого свободная составляющая тока или свободная составляющая напряжения уменьшается в  $e$  раз.

В неразветвленных RL-цепях  $\tau = L/R$ , а в цепях  $\tau = RC$ . При включении цепи к источнику постоянного напряжения ток  $I$  (в RL-цепи) или напряжение  $U_C$  (в RC-цепи) за время  $\tau$  достигает 0,63 от установившегося значения тока  $I$  (в RL-цепи) или напряжения  $U_C$  (в RC-цепи) устанавливается через бесконечно большое время.

Существуют различные критерии определения времени окончания переходного процесса. За время  $t=3\tau$  напряжение на конденсаторе (ток в индуктивной катушке) достигает 0,95 от установившегося значения, а через время  $t=5\tau$  - более 0,99. Аналогичные процессы происходят и при отключении напряжения питания.

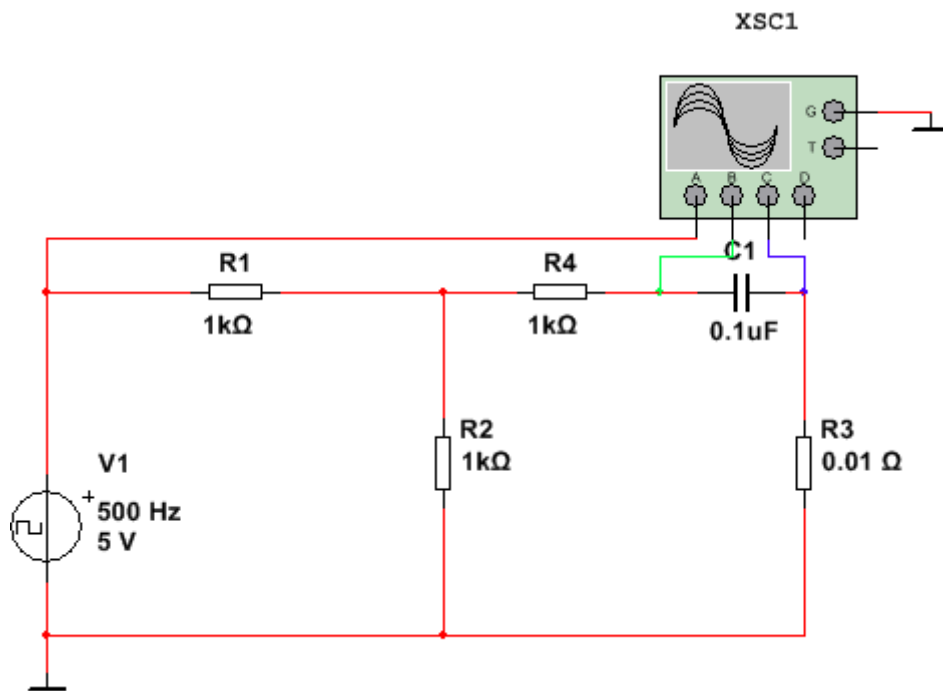


Рисунок 4: ПЭС для моделирования в Multisim

По результатам моделирования заполняем таблицу.

Наименование параметра	Значение параметра во время действия t					
	Импульса мкс			Паузы мкс		
	0	5	10	0	5	10
$I_c(t)$						
$U_c(t)$						

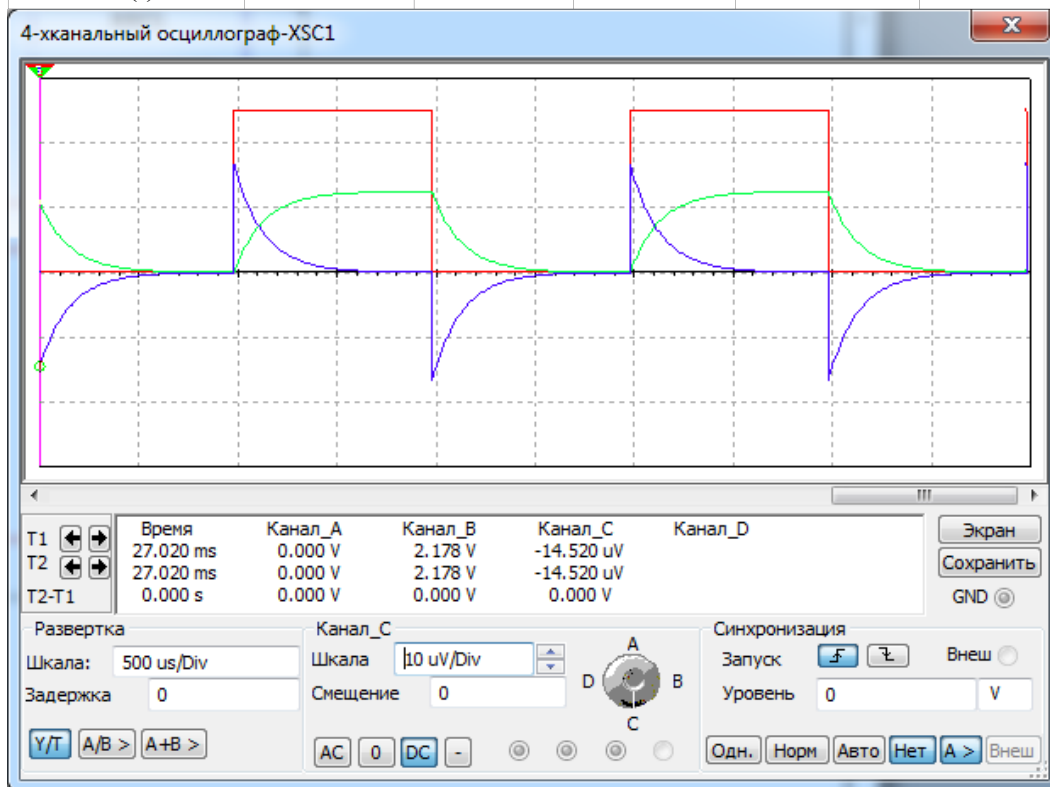


Рисунок 5: Напряжения и токи на разных элементах

**Варианты заданий для RC-цепи**

Варианты	Е , В	R <sub>1</sub> , кОм	R <sub>2</sub> , кОм	R <sub>3</sub> , Ом	R <sub>4</sub> , Ом	С , мкФ
1	5	1.6	2	0.01	1	0.1
2	10	1.5	2	0.01	1	0.1
3	15	1.7	2	0.01	1	0.1
4	6	1.6	2	0.01	1	0.1
5	11	1.5	2	0.01	1	0.1
6	16	1.7	2	0.01	1	0.1
7	4	1.6	2	0.01	1	0.1
8	9	1.5	2	0.01	1	0.1
9	14	1.7	2	0.01	1	0.1
10	5	1.5	2	0.01	1	0.1
11	10	1.6	2	0.01	1	0.1
12	15	1.7	2	0.01	1	0.1
13	6	1.5	2	0.01	1	0.1
14	11	1.7	2	0.01	1	0.1
15	16	1.6	2	0.01	1	0.1
16	4	1.6	2	0.01	1	0.1
17	9	1.5	2	0.01	1	0.1
18	14	1.7	2	0.01	1	0.1
19	5	1.6	2	0.01	1	0.1
20	10	1.6	2	0.01	1	0.1
21	15	1.5	2	0.01	1	0.1
22	6	1.7	2	0.01	1	0.1
23	11	1.6	2	0.01	1	0.1
24	16	1.7	2	0.01	1	0.1
25	4	1.6	2	0.01	1	0.1