

**Расчет переходных процессов в линейной электрической цепи
с сосредоточенными параметрами**
при периодических (с частотой 50 Герц) переключениях ключа

##

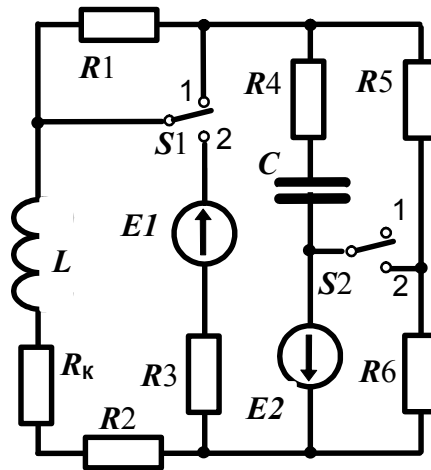


Рис. 1. Заданная
электрическая цепь

Исходные данные (R - в Омах, L - в Генри, C - в Фарадах, E - в Вольтах):

$R := 50$	$R1 := 0.2 \cdot R$	$R1 = 10$	$L := 11 \cdot 10^{-3}$	$Rk := 0.07 \cdot R$	$C := 1 \cdot 10^{-6}$
$R2 := 0.5R$	$R2 = 25$			$Rk = 3.5$	
$R3 := 0.4R$	$R3 = 20$				
$R4 := 0.25 \cdot R$	$R4 = 12.5$	ЭДС (постоянная):	$E1 := 12 \text{ В}$	Мнимая единица: $j := \sqrt{-1}$	
$R5 := 0.8 \cdot R$	$R5 = 40$	ЭДС (постоянная):	$E2 := 18 \text{ В}$		
$R6 := 1.0 \cdot R$	$R6 = 50$	Период переключений ключа:	$T := 0.02 \text{ с}$		
$ORIGIN := 1$					

##

Заданная электрическая цепь (вариант №) представлена на рис. 1. Требуется рассчитать и построить графически изменения напряжений на емкости и на катушке индуктивности и токов через эти элементы при периодических переключениях ключей (идеальных).

Заданную цепь следует рассматривать, как цепь переменной структуры, которая зависит от положения ключей.

Электрическую цепь, в которой работающие ключи находятся в положении "1", будем именовать **первой** цепью, а другую цепь, где ключи в положении "2", - **второй**.

Коммутацию, при которой ключ переключается из положения "2" в положение "1", будем именовать "**первой**", а коммутацию, когда ключ перебрасывается из "1" в "2", - "**второй**".

1. Рассчитаем установившиеся режимы в первой и второй цепях

1.1. Первую цепь в установившемся режиме (при $\omega = 0$) можно представить эквивалентной схемой (рис. 2), где учтено, что при $\omega = 0$ индуктивность L - перемычка ($\omega L = 0$), а емкость C - разрыв ($1/\omega C = \infty$).

Объединяем некоторые сопротивления

$$R_{2k} := R_2 + R_k$$

$$R_{2k} = 28.5$$

$$R_{56} := R_5 + R_6$$

$$R_{56} = 90$$

Затем находим

$$U_{C1} := E_2$$

$$I_{L1} := 0$$

$$U_{C1} = 18$$

$$I_{L1} = 0$$

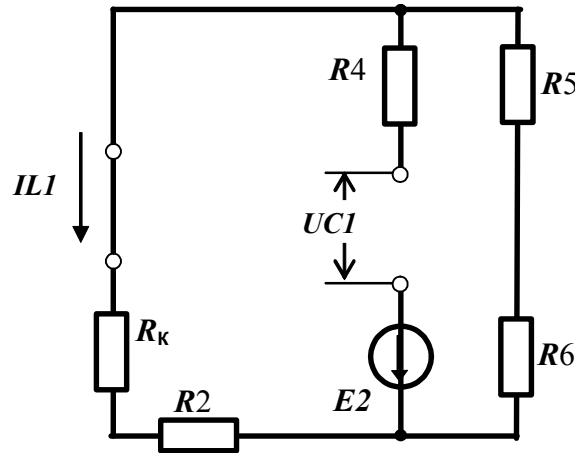


Рис. 2. Первая цепь в установившемся режиме

1.2. Вторую цепь в установившемся режиме (при $\omega = 0$) можно представить эквивалентной схемой (рис. 3), где учтено, что при $\omega = 0$ индуктивность L - перемычка ($\omega L = 0$), а емкость C - разрыв ($1/\omega C = \infty$).

Объединяем некоторые сопротивления

$$R_{15} := R_1 + R_5$$

$$R_{15} = 50$$

$$R_{52k} := \frac{R_{2k} \cdot R_{15}}{R_{2k} + R_{15}} = 18.153$$

$$R_{32k} := \frac{R_3 \cdot R_{2k}}{R_3 + R_{2k}} = 11.753$$

Применяем метод наложения, т.к. в цепи действуют два источника ЭДС.
При действии только первой ЭДС

$$I_{31} := \frac{E_1}{R_3 + R_{52k}}$$

$$I_{L21} := \frac{R_{15} \cdot I_{31}}{(R_{15} + R_{2k})}$$

$$U_{C21} := \frac{R_5 \cdot R_{2k} \cdot I_{31}}{R_{15} + R_{2k}}$$

При действии только второй ЭДС

$$I_{L22} := \frac{R_{32k} \cdot E_2}{R_{2k} \cdot (R_{15} + R_{32k})}$$

$$U_{C22} := \frac{R_5 \cdot E_2}{R_{15} + R_{32k}}$$

При совместном действии двух ЭДС

$$I_{L2} := I_{L21} - I_{L22} = 0.08$$

$$U_{C2} := U_{C21} + U_{C22} = 16.227$$

Рассчитаем процесс после переключения ключа из положения "2" в "1"
(первая коммутация)

3.1. Определим начальные значения искомых величин и их первых производных в 1-ой цепи после первой коммутации

Сначала находим независимые начальные значения (по законам коммутации):

$$\begin{aligned} IL1_0 &:= IL2 & IL1_0 &= 0.08 \\ UC1_0 &:= UC2 & UC1_0 &= 16.227 \end{aligned}$$

Затем находим ЗАВИСИМЫЕ начальные значения, рассматривая эквивалентную схему 1-й цепи непосредственно после коммутации (L заменяем источником тока $IL1_0$, а C - источником ЭДС $UC1_0$). Поскольку в одной ветви эквивалентной схемы (рис. 4) действует источник тока $IL1_0$, при расчете используем метод КОНТУРНЫХ ТОКОВ. Тогда, применяя для решения системы уравнений блок **Given-Find**, получим искомые величины

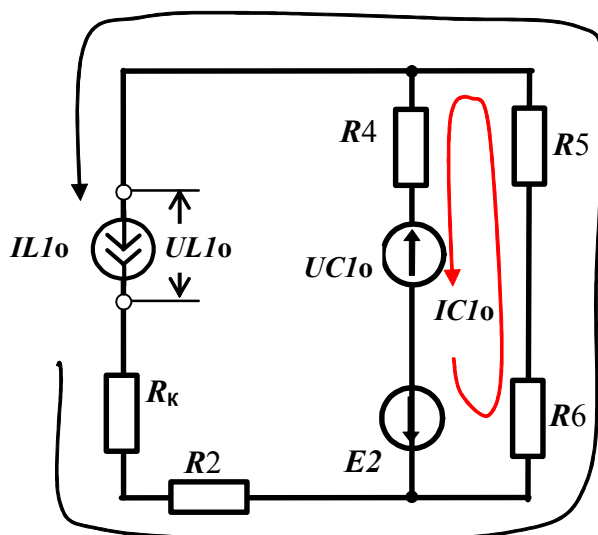


Рис. 4. Первая цепь в начальный момент после коммутации 2-1

Given

$$(R4 + R56) \cdot IC1_0 + R56 \cdot IL1_0 = -UC1_0 + E2$$

$$UL1_0 + R56 \cdot IC1_0 + (R56 + R2k) \cdot IL1_0 = 0$$

$$\begin{pmatrix} IC1_0 \\ UL1_0 \end{pmatrix} := \text{Find}(IC1_0, UL1_0) \text{ float}, 5 \rightarrow \begin{pmatrix} -0.053064 \\ -4.7201 \end{pmatrix}$$

$$IC1_0 = -0.053 \quad UL1_0 = -4.72$$

Отсюда получаем начальные значения производных

$$ILp1_0 := \frac{UL1_0}{L} = -429.1$$

$$UCp1_0 := \frac{IC1_0}{C} = -5.306 \times 10^4$$

4.1. Свободный режим в первой цепи (рис. 5)

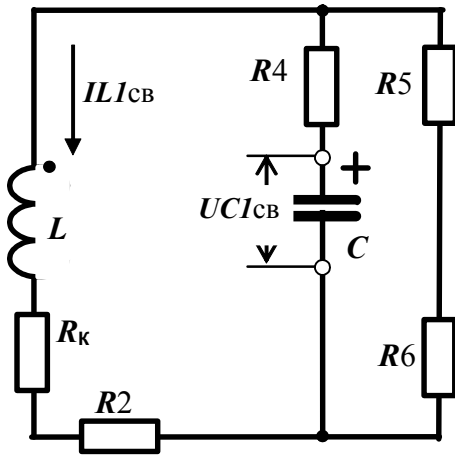


Рис. 5. Первая цепь в свободном режиме

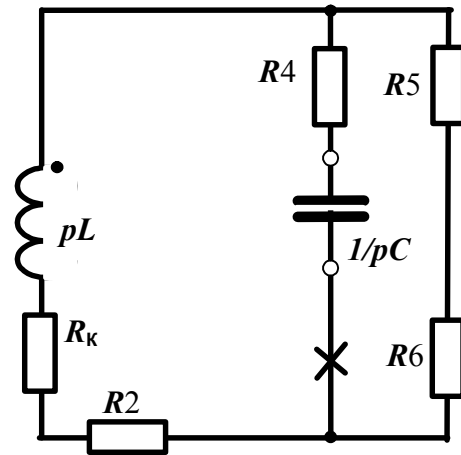


Рис. 6. Вспомогательная цепь для расчета корней характеристического уравнения первой цепи

Составляем вспомогательную схему (рис. 6) для определения корней характеристического уравнения, обозначая сопротивление емкости и индуктивности как $\frac{1}{p \cdot C}$ и $p \cdot L$.

Разрываем цепь в ветви с емкостью и находим эквивалентное сопротивление $Z(p)$ со стороны точек разрыва.

$$Z1(p) := \frac{1}{p \cdot C} + R4 + \frac{R56 \cdot (R2k + p \cdot L)}{R56 + R2k + p \cdot L}$$

Используя операторы символьных вычислений, находим корни уравнения $Z1(p)=0$

$$\begin{pmatrix} p11 \\ p21 \end{pmatrix} := Z1(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float, 3} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -6672.0 - 7783.0j \\ -6672.0 + 7783.0j \end{pmatrix}$$

$$p11 = -6.672 \times 10^3 - 7.783j \times 10^3$$

$$p21 = -6.672 \times 10^3 + 7.783j \times 10^3$$

Поскольку $|\text{Re}(p11)| > 500$ переходный процесс закончится к очередному переключению ключа через 10 мс.

Свободные составляющие представляем в виде

$$iL1cb(t) := A11 \cdot e^{p11 \cdot t} + A21 \cdot e^{p21 \cdot t}$$

$$uC1cb(t) := B11 \cdot e^{p11 \cdot t} + B21 \cdot e^{p21 \cdot t}$$

5.1. Искомые переменные в переходном режиме представляем в виде сумм принужденных и свободных составляющих

$$iL1(t) := IL1 + iL1cb(t)$$

$$uC1(t) := UC1 + uC1cb(t)$$

Определяем постоянные интегрирования $A11, A21, B11, B21$

$$\begin{pmatrix} A11 \\ A21 \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ p11 & p21 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} IL1o - IL1 \\ ILp1o \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} A11 \\ A21 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.04 + 6.781j \times 10^{-3} \\ 0.04 - 6.781j \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} B11 \\ B21 \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ p11 & p21 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} UC1o - UC1 \\ UCp1o \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} B11 \\ B21 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.886 - 4.169j \\ -0.886 + 4.169j \end{pmatrix}$$

Переведем шкалу времени в мс. Тогда

$$P11 := p11 \cdot 0.001 \quad P21 := p21 \cdot 0.001$$

6.1. Записываем выражения, определяющие напряжения и токи в реактивных элементах в переходном режиме *после первой коммутации*

$$\begin{aligned} iL1(t) &:= IL1 + A11 \cdot e^{P11 \cdot t} + A21 \cdot e^{P21 \cdot t} \\ uL1(t) &:= L \cdot (p11 \cdot A11 \cdot e^{P11 \cdot t} + p21 \cdot A21 \cdot e^{P21 \cdot t}) + Rk \cdot iL1(t) \\ uC1(t) &:= UC1 + B11 \cdot e^{P11 \cdot t} + B21 \cdot e^{P21 \cdot t} \\ iC1(t) &:= C \cdot (p11 \cdot B11 \cdot e^{P11 \cdot t} + p21 \cdot B21 \cdot e^{P21 \cdot t}) \end{aligned}$$

Рассчитываем мгновенные значения этих переменных $t := 0, 1 \dots 8$ мс

t =	iL1(t) =	uL1(t) =	uC1(t) =	iC1(t) =
0	0.08	-4.44	16.227	-0.053
1	$2.432 \cdot 10^{-5}$	-0.01	17.989	$8.29 \cdot 10^{-5}$
2	$-1.24 \cdot 10^{-7}$	$5.272 \cdot 10^{-6}$	18	$9.992 \cdot 10^{-8}$
3	$-6.124 \cdot 10^{-11}$	$1.738 \cdot 10^{-8}$	18	$-1.149 \cdot 10^{-10}$
4	$1.878 \cdot 10^{-13}$	$-5.327 \cdot 10^{-12}$	18	$-1.807 \cdot 10^{-13}$
5	0	$-2.881 \cdot 10^{-14}$	18	0
6	0	0	18	0
7	0	0	18	0
8	0	0	18	0

Рассчитаем процесс после переключения ключа из положения "1" в "2"
(**вторая** коммутация)

3.2. Определим начальные значения искоемых величин и их производных во 2-й цепи после **второй** коммутации.

Сначала находим **НЕЗАВИСИМЫЕ** начальные значения (по законам коммутации):

$$\begin{aligned} IL2o &:= IL1 & IL2o &= 0 \\ UC2o &:= UC1 & UC2o &= 18 \end{aligned}$$

Затем находим **ЗАВИСИМЫЕ** начальные значения, рассматривая эквивалентную схему 1-й цепи непосредственно после коммутации (**L** заменяем источником тока **IL2o**, а **C** - источником ЭДС **UC2o**).

Поскольку в одной ветви эквивалентной схемы (рис. 7) действует источник тока **IL2o**, при расчете используем метод **КОНТУРНЫХ ТОКОВ**. Для решения системы уравнений используем блок **Given-Find**.

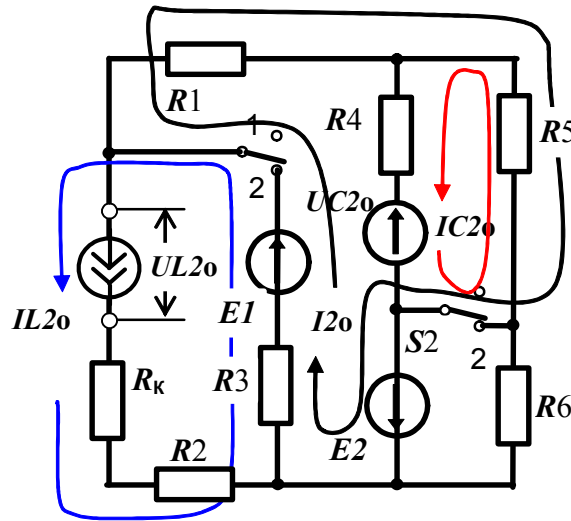


Рис. 7. Вторая цепь в начальный момент после коммутации 1-2

Given

$$(R4 + R5) \cdot IC2o - R5 \cdot I2o = -UC2o$$

$$-R5 \cdot IC2o + (R3 + R5 + R1) \cdot I2o + R3 \cdot IL2o = E1 + E2$$

$$UL2o + R3 \cdot I2o + (R3 + R2k) \cdot IL2o = E1$$

$$\begin{pmatrix} IC2o \\ I2o \\ UL2o \end{pmatrix} := \text{Find}(IC2o, I2o, UL2o) \text{ float}, 5 \rightarrow \begin{pmatrix} -0.028916 \\ 0.41205 \\ 3.759 \end{pmatrix}$$

$$IC2o = -0.029 \quad I2o = 0.412 \quad UL2o = 3.759$$

Отсюда получаем начальные значения производных

$$ILp2o := \frac{UL2o}{L} = 341.727$$

$$UCp2o := \frac{IC2o}{C} = -2.892 \times 10^4$$

3.3. Свободный режим в **второй** цепи (рис. 8)

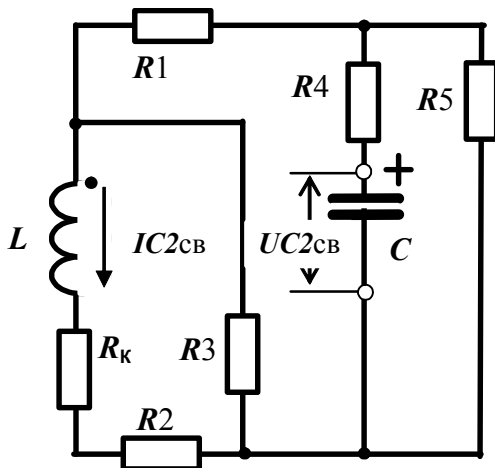


Рис. 8. Вторая цепь в свободном режиме

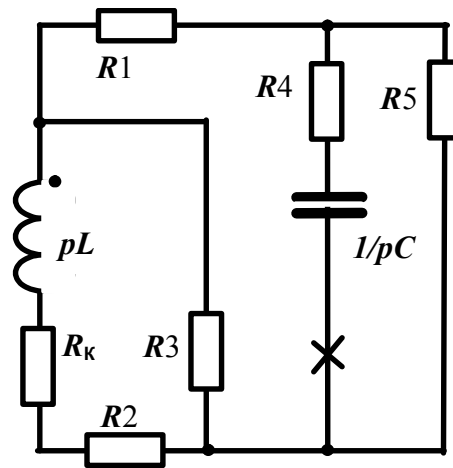


Рис. 9. Вспомогательная цепь для расчета корней характеристического уравнения второй цепи

Составляем вспомогательную схему (рис. 9) для определения корней характеристического уравнения, заменяя ЭДС перемычкой, обозначая сопротивление емкости и индуктивности как $\frac{1}{p \cdot C}$ и $p \cdot L$. Разрываем цепь в ветви с емкостью и находим эквивалентное сопротивление $Z2(p)$ со стороны точек разрыва.

$$Z2(p) := \frac{1}{p \cdot C} + R4 + \frac{R5 \cdot \left[R1 + \frac{R3 \cdot (R2k + p \cdot L)}{R3 + R2k + p \cdot L} \right]}{R5 + \left[R1 + \frac{R3 \cdot (R2k + p \cdot L)}{R3 + R2k + p \cdot L} \right]}$$

Используя операторы символьных вычислений, находим корни уравнения $Z2(p)=0$

$$\begin{pmatrix} p12 \\ p22 \end{pmatrix} := Z2(p) \begin{array}{l} \text{solve, } p \\ \text{float, } 3 \end{array} \rightarrow \begin{pmatrix} -33281.0 \\ -3942.0 \end{pmatrix}$$

$$p12 = -3.328 \times 10^4$$

$$p22 = -3.942 \times 10^3$$

Поскольку $|\text{Re}(p22)| > 500$ переходный процесс закончится к очередному переключению ключа через 10 мс.

Свободные составляющие представляем в виде

$$iL2cb(t) := A12 \cdot e^{p12 \cdot t} + A22 \cdot e^{p22 \cdot t}$$

$$uC2cb(t) := B12 \cdot e^{p12 \cdot t} + B22 \cdot e^{p22 \cdot t}$$

3.4. Искомые переменные в переходном режиме представляем в виде сумм принужденных и свободных составляющих

$$iL2(t) := IL2 + iL2cb(t)$$

$$uC2(t) := UC2 + uC2cb(t)$$

Определяем постоянные интегрирования $A12, A22, B12, B22$

$$\begin{pmatrix} A12 \\ A22 \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ p12 & p22 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} IL2o - IL2 \\ ILp2o \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} A12 \\ A22 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -8.808 \times 10^{-4} \\ -0.079 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} B12 \\ B22 \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ p12 & p22 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} UC2o - UC2 \\ UCp2o \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} B12 \\ B22 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.747 \\ 1.026 \end{pmatrix}$$

Переведем шкалу времени в мс. Тогда

$$P12 := p12 \cdot 0.001$$

$$P22 := p22 \cdot 0.001$$

6.1. Записываем выражения, определяющие напряжения и токи в реактивных элементах в переходном режиме *после второй коммутации*

$$iL2(t) := IL2 + A12 \cdot e^{P12 \cdot t} + A22 \cdot e^{P22 \cdot t}$$

$$uL2(t) := L \cdot (p12 \cdot A12 \cdot e^{P12 \cdot t} + p22 \cdot A22 \cdot e^{P22 \cdot t}) + Rk \cdot iL2(t)$$

$$uC2(t) := UC2 + B12 \cdot e^{P12 \cdot t} + B22 \cdot e^{P22 \cdot t}$$

$$iC2(t) := C \cdot (p12 \cdot B12 \cdot e^{P12 \cdot t} + p22 \cdot B22 \cdot e^{P22 \cdot t})$$

Рассчитываем мгновенные значения этих переменных $t := 0, 1 \dots 8$ мс

$t =$	$iL(t) =$	$uL(t) =$	$uC(t) =$	$iC(t) =$
0	0	3.759	18	-0.029
1	0.079	0.342	16.247	$-7.847 \cdot 10^{-5}$
2	0.08	0.282	16.227	$-1.523 \cdot 10^{-6}$
3	0.08	0.28	16.227	$-2.956 \cdot 10^{-8}$
4	0.08	0.28	16.227	$-5.738 \cdot 10^{-10}$
5	0.08	0.28	16.227	$-1.114 \cdot 10^{-11}$
6	0.08	0.28	16.227	$-2.162 \cdot 10^{-13}$
7	0.08	0.28	16.227	$-4.195 \cdot 10^{-15}$
8	0.08	0.28	16.227	0

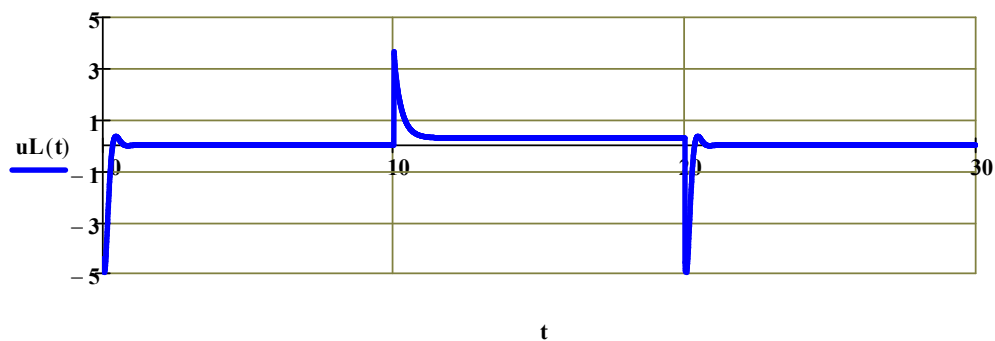
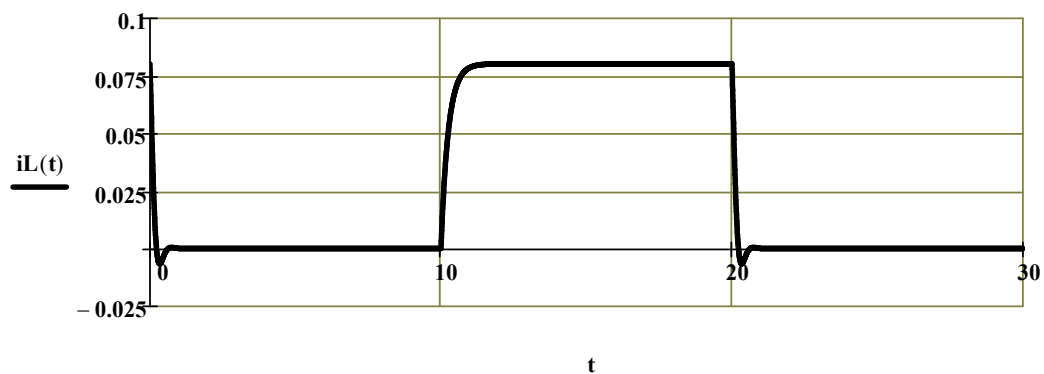
Строим графики процессов при трех коммутациях $t := 0, 0.005 \dots 30$ мс

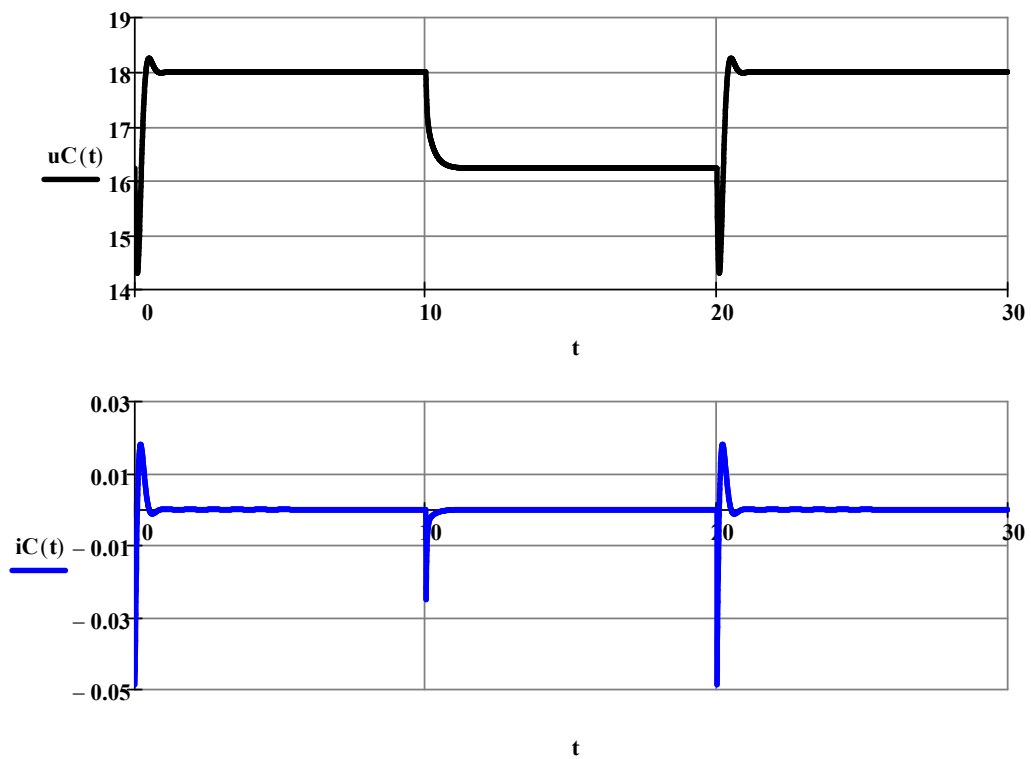
$iL(t) := \text{if}(t \leq 20, \text{if}(t \leq 10, iL(t), iL(t - 10)), iL(t - 20))$

$uL(t) := \text{if}(t \leq 20, \text{if}(t \leq 10, uL(t), uL(t - 10)), uL(t - 20))$

$uC(t) := \text{if}(t \leq 20, \text{if}(t \leq 10, uC(t), uC(t - 10)), uC(t - 20))$

$iC(t) := \text{if}(t \leq 20, \text{if}(t \leq 10, iC(t), iC(t - 10)), iC(t - 20))$





ORIGIN := 1

Расчет переходных процессов МЕТОД ПЕРЕМЕННЫХ СОСТОЯНИЯ

В качестве переменных состояния принимаем ток i_L через индуктивность и напряжение u_C на емкости.

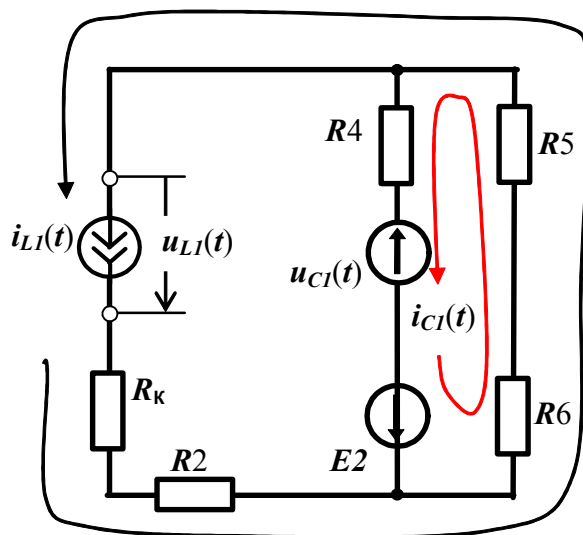


Рис 10. Эквивалентная схема первой цепи для переменных состояния

Рассматриваем (рис. 10) эквивалентную схему **первой** цепи для переменных состояния i_{L1} и U_{C1} (реактивные элементы заменены источниками ЭДС и тока). Первые производные переменных состояния будем обозначать i_{L1p} и U_{C1p} . Составляем уравнения равновесия этой цепи, используя контурные токи: $i_{C1} := C \cdot U_{C1p}$ и i_{L1} , представляя $u_{L1} := L \cdot i_{L1p}$.

Для решения системы уравнений используем блок "Given-Find".

Given

$$(R4 + R56) \cdot C \cdot U_{C1p} + R56 \cdot i_{L1} + U_{C1} = E2$$

$$L \cdot i_{L1p} + (R56 + R2k) \cdot i_{L1} + R56 \cdot (C \cdot U_{C1p}) = 0$$

$$W(i_{L1}, U_{C1}) := \text{Find}(i_{L1p}, U_{C1p}) \text{ float}, 3 \rightarrow \begin{pmatrix} 79.8 \cdot U_{C1} + -3588.0 \cdot i_{L1} - 1436.0 \\ -9756.0 \cdot U_{C1} + -878048.0 \cdot i_{L1} + 175609.0 \end{pmatrix}$$

Система правых частей дифференциальных уравнений состояния в форме Коши для **первой цепи** (переход к стандартным переменным):

$$D1(t, x) := \begin{pmatrix} W(i_{L1}, U_{C1})_1 \\ W(i_{L1}, U_{C1})_2 \end{pmatrix} \left| \begin{array}{l} \text{substitute, } i_{L1} = x_1 \\ \text{float}, 3 \\ \text{substitute, } U_{C1} = x_2 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -3588.0 \cdot x_1 + 79.8 \cdot x_2 - 1436.0 \\ -878000.0 \cdot x_1 + -9756.0 \cdot x_2 + 175600.0 \end{pmatrix}$$

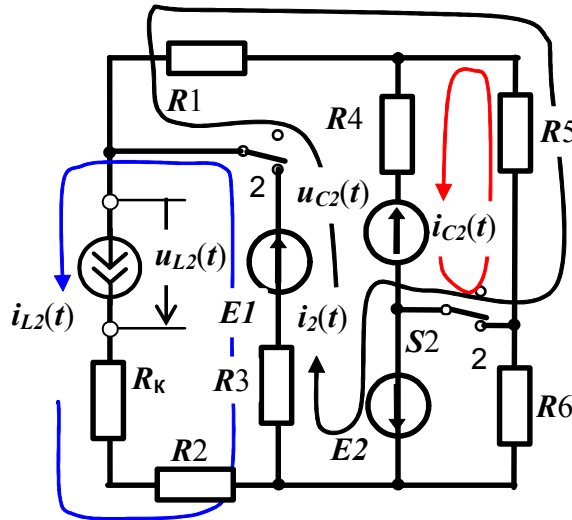


Рис. 11. Эквивалентная схема второй цепи для переменных состояния

Рассматриваем (рис. 11) эквивалентную схему **второй** цепи для переменных состояния i_{L2} и U_{C2} (реактивные элементы заменены источниками ЭДС и тока). Первые производные переменных состояния будем обозначать i_{L2p} и U_{C2p} . Составляем уравнения равновесия этой цепи, используя контурные токи: $i_{C2} := C \cdot U_{C2p}$, i_2 и i_{L2} , представляя $u_{L2} := L \cdot i_{L2p}$.

Для решения системы уравнений используем блок "Given-Find".

$$\begin{aligned} \text{Given} \quad & (R4 + R5) \cdot C \cdot U_{C2p} - R5 \cdot i_2 + U_{C2} = 0 \\ & (R3 + R15) \cdot i_2 - R5 \cdot C \cdot U_{C2p} + R3 \cdot i_{L2} = E1 + E2 \\ & L \cdot i_{L2p} + (R3 + R2k) \cdot i_{L2} + R3 \cdot i_2 = E1 \end{aligned}$$

$$\underline{W}(i_{L2}, U_{C2}) := \text{Find}(i_{L2p}, U_{C2p}, i_2) \text{ float, 3} \rightarrow \begin{pmatrix} 35.0 \cdot U_{C2} + -3489.0 \cdot i_{L2} - 289.0 \\ -33734.0 \cdot U_{C2} + -385542.0 \cdot i_{L2} + 578313.0 \\ -0.0193 \cdot U_{C2} + -0.506 \cdot i_{L2} + 0.759 \end{pmatrix}$$

Система правых частей дифференциальных уравнений состояния в форме Коши для **второй цепи** (переход к стандартным переменным):

$$D2(t, x) := \begin{pmatrix} W(i_{L2}, U_{C2})_1 \\ W(i_{L2}, U_{C2})_2 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{substitute, } i_{L2} = x_1 \\ \text{float, 4} \\ \text{substitute, } U_{C2} = x_2 \end{array} \rightarrow \begin{pmatrix} -3489.0 \cdot x_1 + 35.0 \cdot x_2 - 289.0 \\ -385540.0 \cdot x_1 + -33734.0 \cdot x_2 + 578310.0 \end{pmatrix}$$

Проведем анализ процессов в режиме периодических переключений

Задаем режим расчета

Временной интервал расчета (период T в сек.): начальный $t_n := 0$ и конечный $t_k := T = 0.02$ моменты

Количество шагов при расчете: $N := 400$

Массив расчетных точек: $n := 1..N$

Половина расчетных точек $N1$ попадает в интервал времени, когда ключи в первом положении (работает первая цепь), а другая половина $N2$ - в интервал, когда ключи во втором положении (работает вторая цепь). Количество расчетных точек в каждом интервале :

$$N1 := 0.5 \cdot N = 200$$

$$N2 := 0.5 \cdot N = 200$$

Временные интервалы расчета (в сек.)

$$t1_n := 0$$

$$t1_k := 0.5 \cdot T = 0.01$$

$$t2_n := t1_k = 0.01$$

$$t2_k := T = 0.02$$

Массивы расчетных точек: $n1 := 1..N1$

$n2 := 1..N2$

Находим НАЧАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ переменных состояния
в 1-й цепи после **первой** коммутации (по законам коммутации):

$$IL1_0 := IL2 = 0.08$$

$$UC1_0 := UC2 = 16.227$$

Расчет проводим, используя методы численного интегрирования дифференциальных уравнений

Вектор начальных значений (условий)
для 1-ой цепи

$$X1 := \begin{pmatrix} IL1_0 \\ UC1_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.08 \\ 16.227 \end{pmatrix}$$

Формирование матриц решений дифф. уравнений
посредством встроенной функции **Bulstoer** :

$$Z1 := \text{Bulstoer}(X1, t1_n, t1_k, N1, D1)$$

Выделение массивов численных значений переменных (из общей матрицы):

$$t1 := Z1^{(1)} \quad iL := Z1^{(2)} \quad u1_C := Z1^{(3)}$$

Вывод численных массивов:

	1
--	---

	1
--	---

	1
--	---

$t1 \cdot 10^3 =$	1	0	мс	$i1_L =$	1	0.08	$u1_C =$	1	16.227	В
	2	0.05			2	0.057		2	14.558	
	3	0.1			3	0.034		3	14.347	
	4	0.15			4	0.016		4	14.923	
	5	0.2			5	$3.917 \cdot 10^{-3}$		5	15.795	
	6	0.25			6	$-3.11 \cdot 10^{-3}$		6	16.655	
	7	0.3			7	$-6.127 \cdot 10^{-3}$		7	17.348	
	8	0.35			8	$-6.52 \cdot 10^{-3}$		8	17.825	
	9	0.4			9	$-5.493 \cdot 10^{-3}$		9	18.102	
	10	0.45			10	$-3.93 \cdot 10^{-3}$		10	18.225	
	11	0.5			11	$-2.385 \cdot 10^{-3}$		11	18.244	
	12	0.55			12	$-1.139 \cdot 10^{-3}$		12	18.208	
	13	0.6			13	$-2.804 \cdot 10^{-4}$		13	18.15	
	14	...			14	...		14	...	

Вектор начальных значений (условий)
для 2-ой цепи

$$X2 := \begin{pmatrix} i1_{L_{N1+1}} \\ u1_{C_{N1+1}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.107 \times 10^{-5} \\ 17.996 \end{pmatrix}$$

Формирование матриц решений дифф. уравнений
посредством встроенной функции **Bulstoer** :

$$\underline{\underline{Z2}} := \text{Bulstoer}(X2, t2_n, t2_k, N2, D2)$$

Выделение массивов численных значений переменных (из общей матрицы):

$$t2 := Z2^{\langle 1 \rangle} \quad i2_L := Z2^{\langle 2 \rangle} \quad u2_C := Z2^{\langle 3 \rangle}$$

Вывод численных массивов:

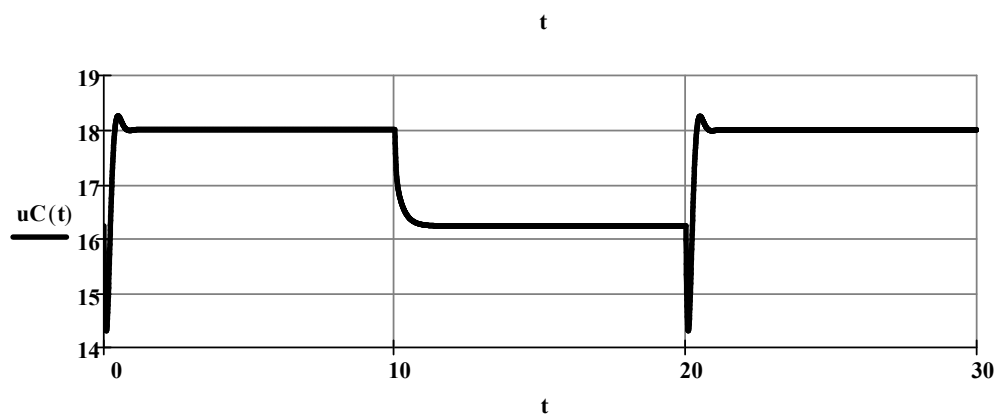
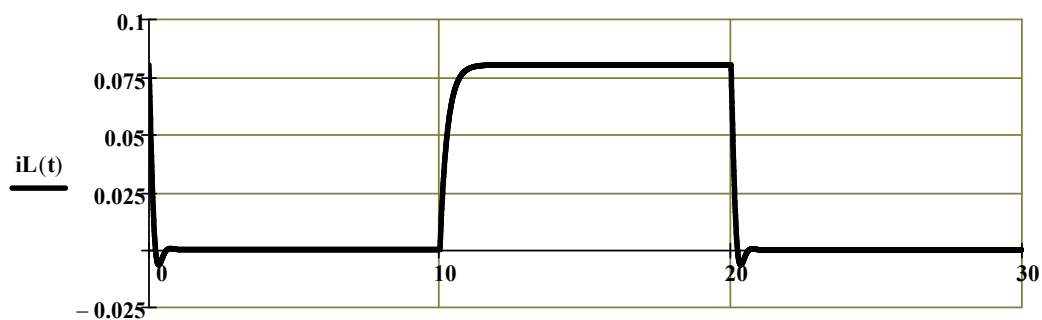
	1
1	10

	1
1	$3.107 \cdot 10^{-5}$

	1
1	17.996

$t \cdot 10^3 =$	2	10.05	мс	$i_{2L} =$	2	0.015	А	$u_{2C} =$	2	17.211	В
	3	10.1			3	0.027			3	16.946	
	4	10.15			4	0.036			4	16.801	
	5	10.2			5	0.044			5	16.695	
	6	10.25			6	0.05			6	16.611	
	7	10.3			7	0.056			7	16.543	
	8	10.35			8	0.06			8	16.487	
	9	10.4			9	0.064			9	16.441	
	10	10.45			10	0.067			10	16.403	
	11	10.5			11	0.069			11	16.372	
	12	10.55			12	0.071			12	16.346	
	13	10.6			13	0.073			13	16.325	
	14	...			14	...			14	...	

Ранее получены графические зависимости



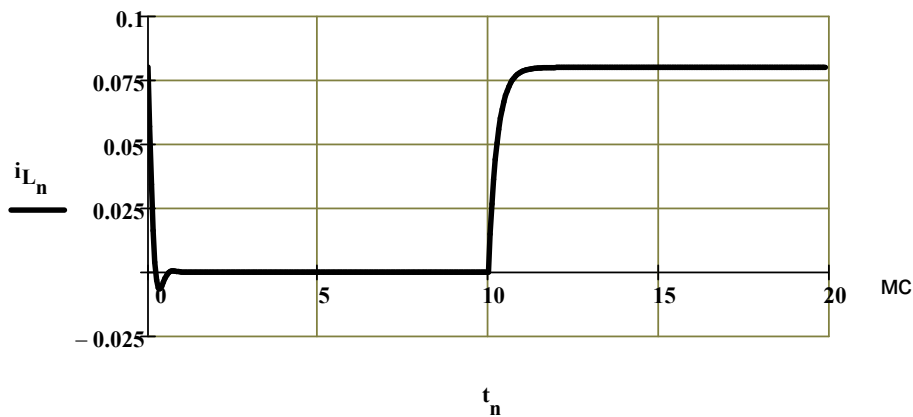
Для графического представления процессов в пределах периода коммутации проводим **объединение матриц** решений систем дифференциальных уравнений (матрица **Z2** подстраивается ниже матрицы **Z1** , количество строк суммируется):

$$Z := \text{stack}(Z1, Z2)$$

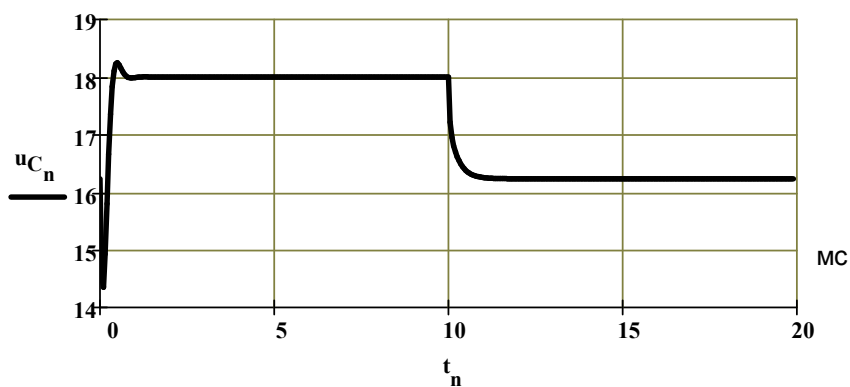
Выделение массивов численных значений переменных (из общей матрицы):

$$t := Z^{(1)} \cdot 10^3 \quad i_L := Z^{(2)} \quad u_C := Z^{(3)}$$

Строим временные зависимости



$$\begin{pmatrix} i_{L_1} \\ i_{L_{N1}} \\ i_{L_N} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.08 \\ 3.107 \times 10^{-5} \\ 0.08 \end{pmatrix}$$



$$\begin{pmatrix} u_{C_1} \\ u_{C_{N1}} \\ u_{C_N} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 16.227 \\ 17.996 \\ 16.229 \end{pmatrix}$$

Графики переходных процессов, полученные в результате расчетов классическим методом и методом переменных состояния совпадают. Следовательно, процессы проанализированы правильно.