СОДЕРЖАНИЕ

Задание №1. Условие

Определить функцию тока i_6 в цепи после замыкания ключа SA0 при следующих параметрах:

$E6 = 500\ В$;
$R1 = 600\ Ом$;
$R2 = 400\ Ом$;
$R3 = 200\ Ом$;
$R4 = 400\ Ом$;
$R5 = 300\ Ом$;
$R6 = 400\ Ом$;
$L6 = 0{,}05\ Гн$;
$C5 = 0{,}475\ мкФ$.

Расчетная электрическая схема цепи представлена на рисунке 1.

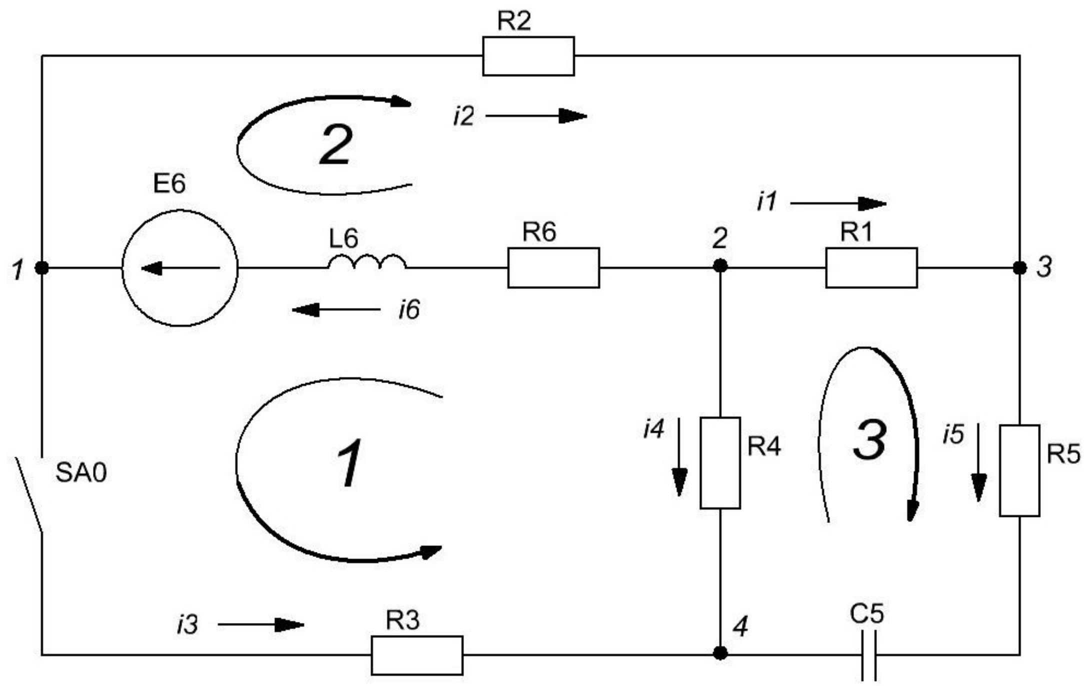

Рисунок 1. Расчетная электрическая схема цепи для определения переходного процесса тока i_6 при замыкании ключа SA0.

Решение задачи произвести классическим и операторным методами.

Решение классическим методом

На основании классического метода ток i_6 в цепи равен сумме его свободной и вынужденной составляющих: $i_6 = i_{6.св} + i_{6.вын}$ [1, 2].

Свободная составляющая тока представляет собой сумму апериодических компонент, число которых равно числу реактивных элементов в цепи. В представленном случае имеются реактивные элементы L6 и C5, поэтому свободный ток $i_{6.св}$ определяется выражением:

$$i_{6.св} = A_0 e^{p_0 t} + A_1 e^{p_1 t}\ А.$$

Величины $p_{0,1}$ – показатели затухания переходного процесса свободной компоненты, определяется из характеристического уравнения цепи, которое, в свою очередь, выводится из системы уравнений цепи при замкнутом ключе SA0 в операторной форме:

$$\begin{cases} E6 = R3 \cdot i_3 - R4 \cdot i_4 + \left(R6 + L6p\right) \cdot i_6 \\ E6 = -R1 \cdot i_1 + R2 \cdot i_2 + \left(R6 + L6p\right) \cdot i_6 \\ -u_{C5}(0) = R1 \cdot i_1 - R4 \cdot i_4 + \left(R5 + \dfrac{1}{C5p}\right) \cdot i_5 \\ 0 = i_2 + i_3 - i_6 \\ 0 = i_1 + i_4 + i_6 \\ 0 = -i_1 - i_2 + i_5 \end{cases} \tag{1}$$

Характеристическое уравнение цепи получаем из (1):

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & R3 & -R4 & 0 & R6+L6p \\ -R1 & R2 & 0 & 0 & 0 & R6+L6p \\ R1 & 0 & 0 & -R4 & R5+\dfrac{1}{C5p} & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = 0 \quad ,$$

Из которого:

$$p_{0,1} = \begin{pmatrix} -15476,81 \\ -3123,58 \end{pmatrix} .$$

Вынужденная составляющая определяется характером источника ЭДС и может быть легко найдена для установившегося режима работы цепи:

$$i_{6.вын} = \frac{E6}{R6 + \dfrac{(R1+R2)(R3+R4)}{R1+R2+R3+R4}} = \frac{500}{400 + \dfrac{(600+400)\cdot(200+400)}{600+400+200+400}} = 0,645\ A \quad .$$

Величины $A_{0,1}$ – стартовые значения апериодического процесса слагаемых свободной составляющей, определяются из следующей системы уравнений тока i_6 для момента времени $t = 0$:

$$\begin{cases} i_6\left(0\right) = i_{6.вын} + i_{6.св}\left(0\right) = i_{6.вын} + A_0 + A_1; \\ \left.\dfrac{di_6}{dt}\right|_{t=0} = A_0 p_0 + A_1 p_1. \end{cases} \tag{2}$$

Ток $i_6(0)$ определяется как независимое начальное условие на основании закона коммутации тока через индуктивность: $i_L(0-) = i_L(0+) = i_L(0)$. Таким образом:

$$i_6(0-) = i_6(0) = \frac{E6}{R1+R2+R6} = \frac{500}{600+400+400} = 0,357\ A.$$

Производная тока i_6 в (2) при $t = 0$ может быть найдена из системы уравнений, записанной в операторной форме, для момента замыкания ключа SA0:

$$\begin{cases} E6 - R6 \cdot i_6(0) = L6 \cdot pi_6\big|_{t=0} + R3 \cdot i_3(0) - R4 \cdot i_4(0) \\ E6 - R6 \cdot i_6(0) = L6 \cdot pi_6\big|_{t=0} - R1 \cdot i_1(0) + R2 \cdot i_2(0) \\ -u_{C5}(0) = R1 \cdot i_1(0) - R4 \cdot i_4(0) + R5 \cdot i_5(0) \\ i_6(0) = i_2(0) + i_3(0) \\ i_6(0) = -i_1(0) - i_4(0) \\ 0 = i_1(0) + i_2(0) - i_5(0) \end{cases} \qquad (3)$$

Решив систему (3) относительно зависимых начальных условий для токов в ветвях цепи и первой производной искомого тока i_6, получим:

$$pi_6\big|_{t=0} = 4629{,}63$$

Таким образом, система (2), при подстановке числовых значений, примет вид:

$$\begin{cases} -0{,}288 = A_0 + A_1; \\ 4629{,}63 = -15476{,}81 A_0 - 3123{,}58 A_1, \end{cases}$$

решив которую получим:

$$A_0 = -0{,}302;$$
$$A_1 = 0{,}014.$$

Итого выражение тока i_6 примет вид:

$$i_6(t) = 0{,}645 - 0{,}302 e^{-15476{,}81t} + 0{,}014 e^{-3123{,}58t} \ A.$$

График функции тока i_6 изображен на рисунке 2.

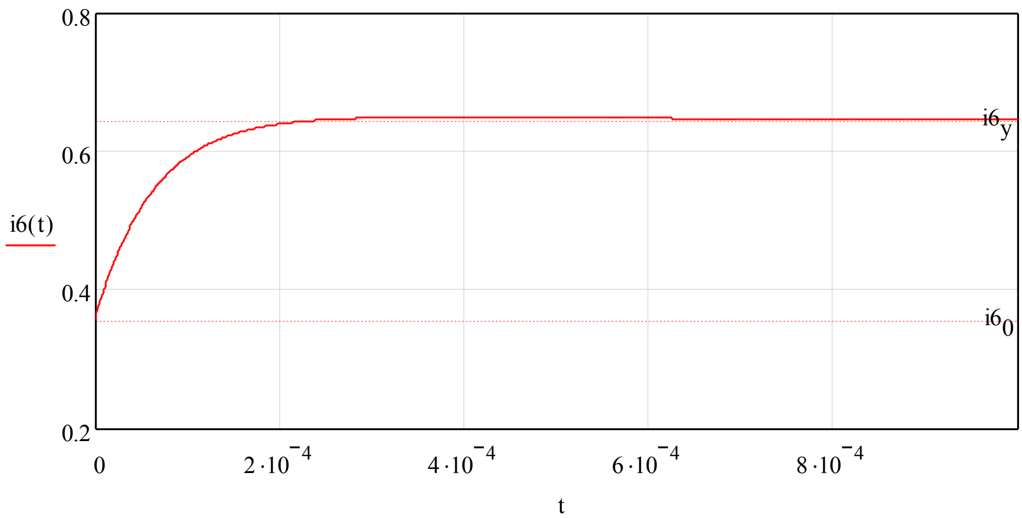

Рисунок 2. График переходного процесса тока i_6

Решение операторным методом

Согласно операторному методу необходимо найти изображение по Лапласу для искомого тока i_6 в виде $I_6(p)$. Для этого запишем уравнение цепи для мгновенных значений после коммутации и преобразуем его по Лапласу [1, 2]:

$$
\begin{cases}
\dfrac{E6}{p} + L6 \cdot i_6(0) = R3 \cdot I_3(p) - R4 \cdot I_4(p) + (R6 + L6p) \cdot I_6(p) \\
\dfrac{E6}{p} + L6 \cdot i_6(0) = -R1 \cdot I_1(p) + R2 \cdot I_2(p) + (R6 + L6p) \cdot I_6(p) \\
\dfrac{-u_{C5}(0)}{p} = R1 \cdot I_1(p) - R4 \cdot I_4(p) + \left(R5 + \dfrac{1}{C5p} \right) \cdot I_5(p) \\
0 = I_2(p) + I_3(p) - I_6(p) \\
0 = I_1(p) + I_4(p) + I_6(p) \\
0 = -I_1(p) - I_2(p) + I_5(p)
\end{cases}
\tag{4}
$$

К моменту коммутации емкость С5 будет заряжена до напряжения $u_{C5}(0)$, которое определяется законом коммутации для напряжения на емкости:

$$u_{C5}(0) = u_{C5}(0-) = R1 \cdot i_6(0) = 600 \cdot 0,357 = 214,286\ B \quad .$$

Решение системы (4) дает изображение по Лапласу для тока i_6 следующего вида:

$$I_6(p) = \frac{p^2 + 3,156 \cdot 10^4 p + 8,733 \cdot 10^7}{2,8p\left(p^2 + 1,86 \cdot 10^4 p + 4,834 \cdot 10^7\right)}$$

Оригинал тока i_6 найдем , применив теорему разложения [1]:

$$i_6(t) = \frac{F1(0)}{F2'(0)} e^0 + \sum_{i=0}^{1} \frac{F1(p_i)}{F2'(p_i)} e^{p_i t} = \frac{8,733}{13,54} + \frac{-1,616}{5,353} e^{-15476,81t} + \frac{-1,493}{-108} e^{-3123,58t} =$$
$$= 0,645 - 0,302 e^{-15476,81t} + 0,014 e^{-3123,58t}\ A,$$

где $F1$(p) – числитель изображения I_6(p); $F1$`(p) – производная знаменателя изображения I_6(p).

Очевидно, что функции тока i_6, рассчитанные обоими методами, совпадают.

График переходной функции тока i_6, полученный операторным методом, приведен на рисунке 3.

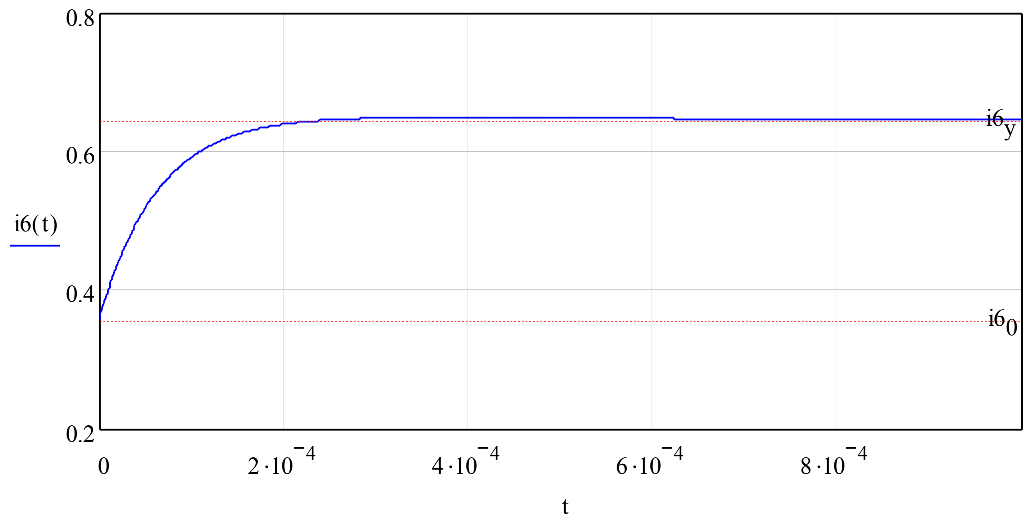

Рисунок 3. Переходная функция тока i_6.

Задание №2. Условие

Определить функцию тока i_3 в цепи после замыкания ключа SA0 при следующих параметрах:

$E3 = 100\ В;$
$R1 = R2 = R3 = R4 = R5 = R6 = 10\ Ом;$
$L3 = 0{,}001\ Гн;$
$C5 = 10^{-5}\ Ф.$

Расчетная электрическая схема цепи представлена на рисунке 1.

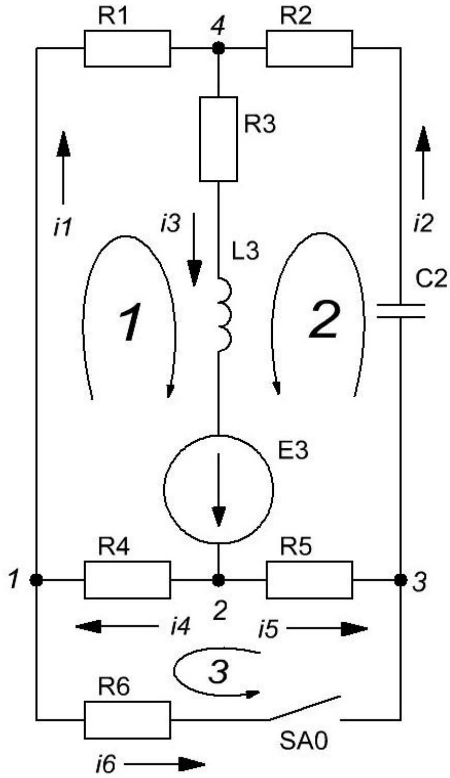

Рисунок 1. Расчетная электрическая схема цепи для определения переходного процесса тока i_3 при замыкании ключа SA0.

Решение получить классическим и операторным методами.

Решение классическим методом

На основании классического метода ток i_3 в цепи равен сумме его свободной и вынужденной составляющих: $i_3 = i_{3.св} + i_{3.вын}$ [1, 2].

Свободная составляющая тока представляет собой сумму апериодических компонент, число которых равно числу реактивных элементов в цепи. В представленном случае имеются реактивные элементы L3 и C2, поэтому свободный ток $i_{3.св}$ определяется выражением:

$$i_{3.св} = A_0 e^{p_0 t} + A_1 e^{p_1 t}\ A.$$

Величины $p_{0,1}$ – показатели затухания переходного процесса свободной компоненты, определяется из характеристического уравнения цепи, которое, в свою очередь, выводится из системы уравнений цепи при замкнутом ключе SA0 в операторной форме:

$$\begin{cases} E3 = R3 \cdot i_1 + R4 \cdot i_4 + (R3 + L3p) \cdot i_3 \\ E3 - u_{C2}(0) = \left(R2 + \dfrac{1}{C2p} \right) \cdot i_2 + (R3 + L3p) \cdot i_3 + R5 \cdot i_5 \\ 0 = R4 \cdot i_4 - R5 \cdot i_5 + R6 \cdot i_6 \\ 0 = i_1 - i_4 + i_6 \\ 0 = -i_3 + i_4 + i_5 \\ 0 = i_2 - i_5 - i_6 \end{cases} \tag{1}$$

Характеристическое уравнение цепи получаем из (1):

$$\begin{vmatrix} R3 & 0 & R3 + L3p & R4 & 0 & 0 \\ 0 & R2 + \dfrac{1}{C2p} & R3 + L3p & 0 & R5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R4 & -R5 & R6 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 \end{vmatrix} = 0 \quad ,$$

Из которого:

$$p_{0,1} = \begin{pmatrix} -5470,66 \\ -18279,34 \end{pmatrix} \ .$$

Вынужденная составляющая определяется характером источника ЭДС и может быть легко найдена для установившегося режима работы цепи:

$$i_{3.вын} = \frac{E3}{R1 + R3 + \dfrac{R4 \cdot (R5 + R6)}{R4 + R5 + R6}} = \frac{100}{10 + 10 + \dfrac{10 \cdot (10 + 10)}{10 + 10 + 10}} = 3,75 \ A \qquad .$$

Величины $A_{0,1}$ – стартовые значения апериодического процесса слагаемых свободной составляющей, определяются из следующей системы уравнений тока i_3 для момента времени $t = 0$:

$$\begin{cases} i_3(0) = i_{3.вын} + i_{3.св}(0) = i_{3.вын} + A_0 + A_1; \\ \left. \dfrac{di_3}{dt} \right|_{t=0} = A_0 p_0 + A_1 p_1. \end{cases} \tag{2}$$

Ток $i_3(0)$ определяется как независимое начальное условие на основании закона коммутации тока через индуктивность: $i_L(0-) = i_L(0+) = i_L(0)$. Таким образом:

$$i_3(0-) = i_3(0) = \frac{E3}{R1 + R3 + R4} = \frac{100}{10 + 10 + 10} = 3,333 \ A.$$

Производная тока i_3 в (2) при $t = 0$ может быть найдена из системы уравнений, записанной в операторной форме, для момента замыкания ключа SA0:

$$\begin{cases} E3 - R3 \cdot i_3(0) = L3 \cdot pi_3\big|_{t=0} + R1 \cdot i_1(0) + R4 \cdot i_4(0) \\ E3 - R3 \cdot i_3(0) - u_{C2}(0) = L3 \cdot pi_3\big|_{t=0} + R2 \cdot i_2(0) + R5 \cdot i_5(0) \\ 0 = R4 \cdot i_4(0) - R5 \cdot i_5(0) + R6 \cdot i_6(0) \\ 0 = i_1(0) - i_4(0) + i_6(0) \\ i_3(0) = i_4(0) + i_5(0) \\ 0 = -i_2(0) + i_5(0) + i_6(0) \end{cases} \tag{3}$$

Решив систему (3) относительно зависимых начальных условий для токов в ветвях цепи и первой производной искомого тока i_3, получим:

$pi_3|_{t=0} = 0$

Таким образом, система (2), при подстановке числовых значений, примет вид:

$$\begin{cases} -0{,}417 = A_0 + A_1; \\ 0 = -5470{,}66A_0 - 18279{,}34A_1, \end{cases}$$

решив которую получим:

$A_0 = -0{,}595;$
$A_1 = 0{,}178.$

Итого выражение тока i_6 примет вид:

$$i_3(t) = 3{,}75 - 0{,}595e^{-5470{,}66t} + 0{,}178e^{-18279{,}34t}\ A.$$

График функции тока i_3 изображен на рисунке 2.

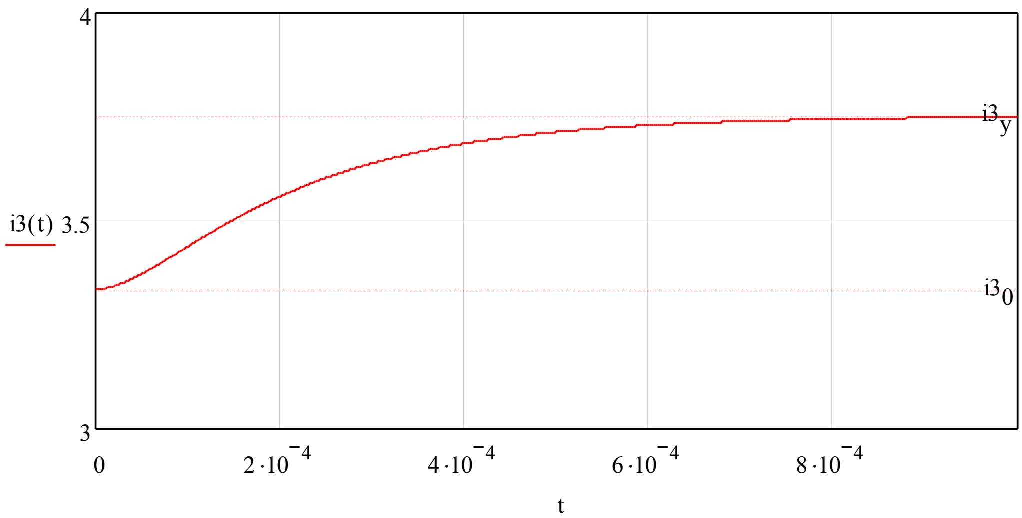

Рисунок 2. График переходной функции тока i_3.

Решение операторным методом

Согласно операторному методу необходимо найти изображение по Лапласу для искомого тока i_3 в виде $I_3(p)$. Для этого запишем уравнение цепи для мгновенных значений после коммутации и преобразуем его по Лапласу [1, 2]:

$$\begin{cases} \dfrac{E3}{p} + L3 \cdot i_3(0) = R3 \cdot I_1(p) + R4 \cdot I_4(p) + (R3 + L3p) \cdot I_3(p) \\ \dfrac{E3 - u_{C2}(0)}{p} + L3 \cdot i_3(0) = \left(R2 + \dfrac{1}{C2p}\right) \cdot I_2(p) + (R3 + L3p) \cdot I_3(p) + R5 \cdot I_5(p) \\ 0 = R4 \cdot I_4(p) - R5 \cdot I_5(p) + R6 \cdot I_6(p) \\ 0 = I_1(p) - I_4(p) + I_6(p) \\ 0 = -I_3(p) + I_4(p) + I_5(p) \\ 0 = I_2(p) - I_5(p) - I_6(p) \end{cases} \qquad (4)$$

К моменту коммутации емкость С2 будет заряжена до напряжения $u_{C2}(0)$, которое определяется законом коммутации для напряжения на емкости:

$$u_{C2}(0) = u_{C2}(0-) = E3 - R3 \cdot i_3(0) = 100 - 10 \cdot 3{,}333 = 66{,}67\ B.$$

Решение системы (4) дает изображение по Лапласу для тока i_3 следующего вида:

$$I_3(p) = \frac{10}{3} \cdot \frac{p^2 + 23750p + 112500000}{p \cdot (p^2 + 23750p + 10^8)}$$

Оригинал тока i_3 найдем, применив теорему разложения [1]:

$$i_3(t)=\frac{F1(0)}{F2'(0)}e^0+\sum_{i=0}^{1}\frac{F1(p_i)}{F2'(p_i)}e^{p_i t}=\frac{3{,}75}{1}+\frac{4{,}166}{-7{,}007}e^{-5470{,}66t}+\frac{4{,}167}{0{,}234}e^{-18279{,}34t}=$$
$$=3{,}75-0{,}595e^{-5470{,}66t}+0{,}178e^{-18279{,}34t}\ A,$$

где $F1$(p) – числитель изображения I_3(p); $F1$\`(p) – производная знаменателя изображения I_3(p).

Очевидно, что функции тока i_3, рассчитанные обоими методами, совпадают.

График переходной функции тока i_3, полученный операторным методом, приведен на рисунке 3.

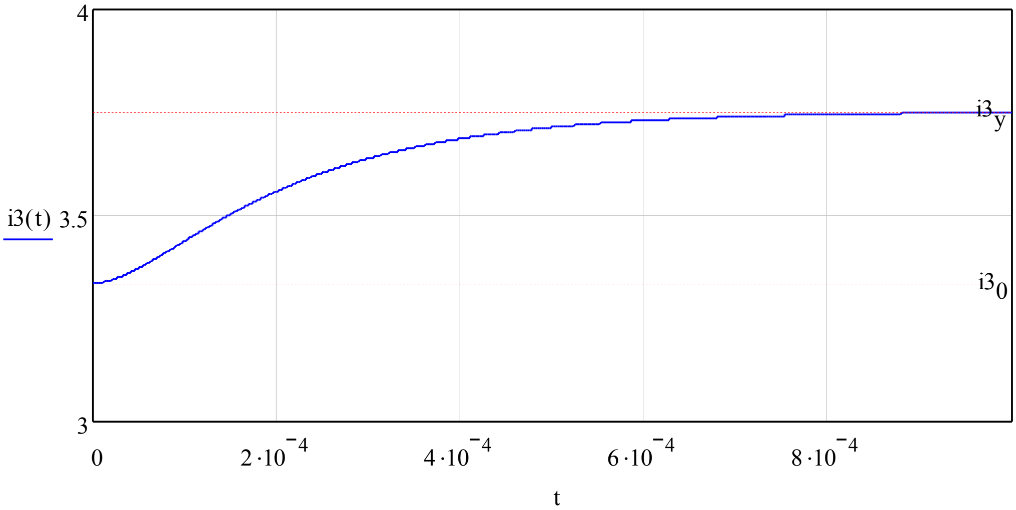

Рисунок 3. График переходной функции тока i_3.

Итого решения обоими методами совпадают.

Задание №3. Условие

Определить функцию тока i_2 в цепи после замыкания ключа SA0 при следующих параметрах:

$E5 = 1000\ В;$

$R1 = 800\ Ом;$

$R2 = 700\ Ом;$

$R3 = 900\ Ом;$

$R4 = 500\ Ом;$

$R5 = 600\ Ом;$

$R6 = 900\ Ом;$

$L2 = 0{,}4\ Гн;$

$C6 = 10^{-5}\ Ф.$

Расчетная электрическая схема цепи представлена на рисунке 1.

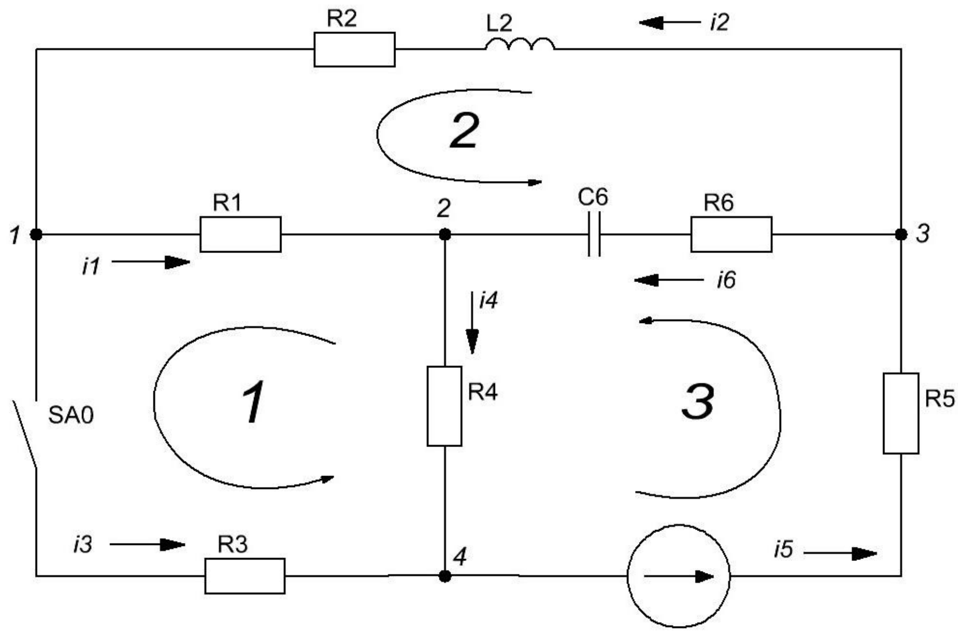

Рисунок 1. Расчетная электрическая схема цепи для определения переходного процесса тока i_2 при замыкании ключа SA0.

Решение классическим методом

На основании классического метода ток i_2 в цепи равен сумме его свободной и вынужденной составляющих: $i_2 = i_{2.св} + i_{2.вын}$ [1, 2].

Свободная составляющая тока представляет собой сумму апериодических компонент, число которых равно числу реактивных элементов в цепи. В представленном случае имеются реактивные элементы L2 и C6, поэтому свободный ток $i_{2.св}$ определяется выражением:

$i_{2.св} = A_0 e^{p_0 t} + A_1 e^{p_1 t}\ A.$

Величины $p_{0,1}$ – показатели затухания переходного процесса свободной компоненты, определяется из характеристического уравнения цепи, которое, в свою очередь, выводится из системы уравнений цепи при замкнутом ключе SA0 в операторной форме:

$$\begin{cases} 0 = -R1\cdot i_1 + R3\cdot i_3 - R4\cdot i_4 \\ u_{C6}(0) = R1\cdot i_1 + (R2 + L2p)\cdot i_2 - \left(R6 + \dfrac{1}{C6p}\right)\cdot i_6 \\ E5 - u_{C6}(0) = R4\cdot i_4 + R5\cdot i_5 + \left(R6 + \dfrac{1}{C6p}\right)\cdot i_6 \\ 0 = i_1 - i_2 + i_3 \\ 0 = -i_1 + i_4 - i_6 \\ 0 = i_2 - i_5 + i_6 \end{cases} \qquad (1)$$

Характеристическое уравнение цепи получаем из (1):

$$\begin{vmatrix} -R1 & 0 & R3 & -R4 & 0 & 0 \\ R1 & R2+L2p & 0 & 0 & 0 & -\left(R6+\dfrac{1}{C6p}\right) \\ 0 & 0 & 0 & R4 & R5 & R6+\dfrac{1}{C6p} \\ 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{vmatrix} = 0 \quad ,$$

Из которого:

$$p_{0,1} = \begin{pmatrix} -3709,25 \\ -65,45 \end{pmatrix} \quad .$$

Вынужденная составляющая определяется характером источника ЭДС и может быть легко найдена для установившегося режима работы цепи:

$$i_{2.вын} = \frac{E5}{R2 + R5 + \dfrac{R3(R1+R4)}{R1+R3+R4}} = \frac{1000}{700 + 600 + \dfrac{900\cdot(800+500)}{900+800+500}} = 0,546\ A \quad .$$

Величины $A_{0,1}$ – стартовые значения апериодического процесса слагаемых свободной составляющей, определяются из следующей системы уравнений тока i_6 для момента времени $t = 0$:

$$\begin{cases} i_2(0) = i_{2.вын} + i_{2.св}(0) = i_{2.вын} + A_0 + A_1; \\ \left.\dfrac{di_2}{dt}\right|_{t=0} = A_0p_0 + A_1p_1. \end{cases} \qquad (2)$$

Ток $i_2(0)$ определяется как независимое начальное условие на основании закона коммутации тока через индуктивность: $i_L(0-) = i_L(0+) = i_L(0)$. Таким образом:

$$i_2(0-) = i_2(0) = \frac{E5}{R1 + R2 + R4 + R5} = \frac{1000}{800 + 700 + 500 + 600} = 0,385\ A.$$

Производная тока i_2 в (2) при $t = 0$ может быть найдена из системы уравнений, записанной в операторной форме, для момента замыкания ключа SA0:

$$\begin{cases} 0 = -R1\cdot i_1(0) + R3\cdot i_3(0) - R4\cdot i_4(0) \\ u_{C6}(0) - R2\cdot i_2(0) = R1\cdot i_1(0) + L2pi_2\big|_{t=0} - R6\cdot i_6(0) \\ E5 - u_{C6}(0) = R4\cdot i_4(0) + R5\cdot i_5(0) + R6\cdot i_6(0) \\ 0 = i_1(0) - i_2(0) + i_3(0) \\ 0 = -i_1(0) + i_4(0) - i_6(0) \\ 0 = i_2(0) - i_5(0) + i_6(0) \end{cases} \qquad (3)$$

Решив систему (3) относительно зависимых начальных условий для токов в ветвях цепи и первой производной искомого тока i_2, получим:

$$pi_2|_{t=0}=617{,}47$$

Таким образом, система (2), при подстановке числовых значений, примет вид:

$$\begin{cases} -0{,}161 = A_0 + A_1; \\ 617{,}47 = -3709{,}25A_0 - 65{,}45A_1, \end{cases}$$

решив которую получим:

$$A_0=-0{,}166;$$
$$A_1=0{,}0053.$$

Итого выражение тока i_6 примет вид:

$$i_6(t)=0{,}546-0{,}166e^{-3709{,}25t}+0{,}0053e^{-65{,}45t}\ A.$$

График функции тока i_6 изображен на рисунке 2.

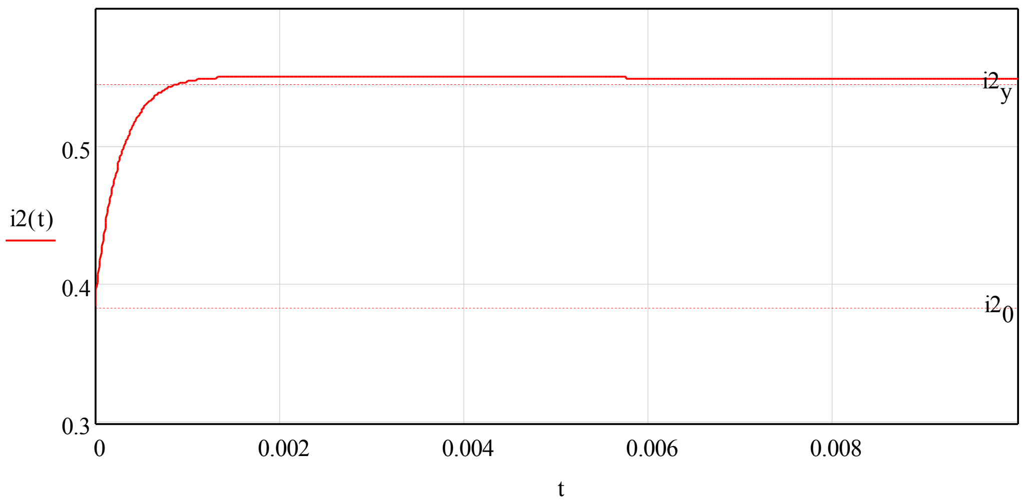

Рисунок 2. График переходной характеристики тока i_2.

Решение операторным методом

Согласно операторному методу необходимо найти изображение по Лапласу для искомого тока i_2 в виде $I_2(p)$. Для этого запишем уравнение цепи для мгновенных значений после коммутации и преобразуем его по Лапласу [1, 2]:

$$\begin{cases} 0=-R1\cdot I_1(p)+R3\cdot I_3(p)-R4\cdot I_4(p) \\ \dfrac{u_{C6}(0)}{p}+L2\cdot i_2(0)=R1\cdot I_1(p)+\left(R2+L2p\right)\cdot I_2(p)-\left(R6+\dfrac{1}{C6p}\right)\cdot I_6(p) \\ \dfrac{E5-u_{C6}(0)}{p}=R4\cdot I_4(p)+R5\cdot I_5(p)+\left(R6+\dfrac{1}{C6p}\right)\cdot I_6(p) \\ 0=I_1(p)-I_2(p)+I_3(p) \\ 0=-I_1(p)+I_4(p)-I_6(p) \\ 0=I_2(p)-i_5(p)+I_6(p) \end{cases} \qquad (4)$$

К моменту коммутации емкость C6 будет заряжена до напряжения $u_{C6}(0)$, которое определяется законом коммутации для напряжения на емкости:

$$u_{C6}(0)=u_{C6}(0-)=(R1+R2)\cdot i_2(0)=(800+700)\cdot 0{,}385=576{,}9\ B$$.

Решение системы (4) дает изображение по Лапласу для тока i_3 следующего вида:

$$I_2(p)=\frac{31{,}923p^2+1{,}718\cdot10^5p+1{,}1\cdot10^7}{p\cdot\left(83p^2+313300p+0{,}2\cdot10^8\right)}$$

Оригинал тока i_2 найдем, применив теорему разложения [1]:

$$i_2(t) = \frac{F1(0)}{F2'(0)} e^0 + \sum_{i=0}^{1} \frac{F1(p_i)}{F2'(p_i)} e^{p_i t} = \frac{1{,}1}{2{,}015} + \frac{-18{,}7}{1{,}122} e^{-3709{,}25t} + \frac{-107{,}6}{-1{,}979} e^{-65{,}45t} =$$

$$= 0{,}546 - 0{,}167 e^{-3709{,}25t} + 5{,}44 \cdot 10^{-3} e^{-65{,}45t} \ \ A,$$

где $F1$(p) – числитель изображения I_2(p); $F1$`(p) – производная знаменателя изображения I_2(p).

Очевидно, что функции тока i_2, рассчитанные обоими методами, практически совпадают. График переходной функции тока i_2, полученный операторным методом, приведен на рисунке 3.

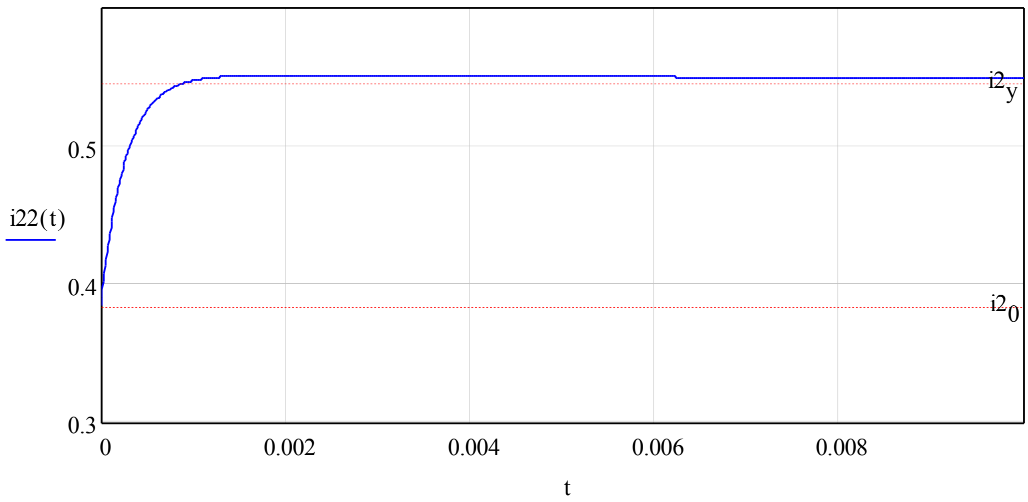

Рисунок 3. График переходной характеристики тока i_2.

ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Атабеков Г. И. Основы теории цепей. Учебник для вузов. М., «Энергия», 1969. 424 с. с илл.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – 9-е изд., перераб. и доп. – М.: «Высшая школа», 1996. – 638 с.