

Приложения, как правило, выполняют на листах формата А4. Допускается оформлять приложения на листах формата А3, А4 х 3, А4 х 2, А2 и А1 по ГОСТ 2.301.

Текст каждого приложения, при необходимости, может быть разделён на разделы, подразделы, пункты, подпункты, которые нумеруют в пределах каждого приложения. Перед номером ставится обозначение этого приложения.

2 Расчёт переходных процессов в линейных электрических цепях

Для электрической цепи, соответствующей номеру варианта и изображенной на рисунках 1-16, требуется определить закон изменения во времени тока после коммутации в одной из ветвей схемы или напряжения, на каком-либо элементе или между заданными точками схемы. В цепи действует постоянная э.д.с. E . Параметры цепи заданы в таблице 2.1

Задачу следует решить двумя методами: классическим и операторным. На основании полученного аналитического

выражения требуется построить график изменения искомой величины в функции времени на интервале $t = 0$ до $t = 3/|p|_{\min}$. Здесь $|p|_{\min}$ – меньший по модулю корень характеристического уравнения.

№ варианта задания на курсовую работу студенты выбирают по двум последним цифрам своего шифра.

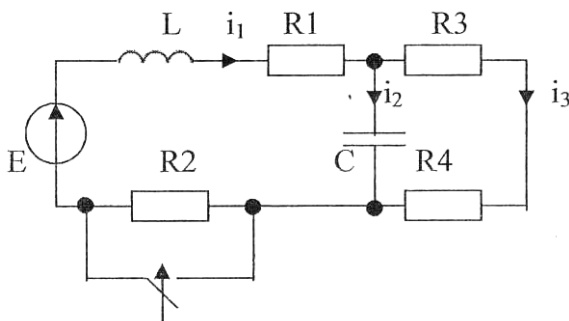


Рисунок 1

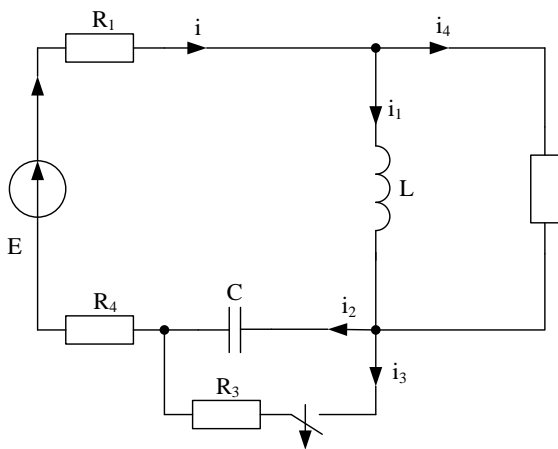


Рисунок 2

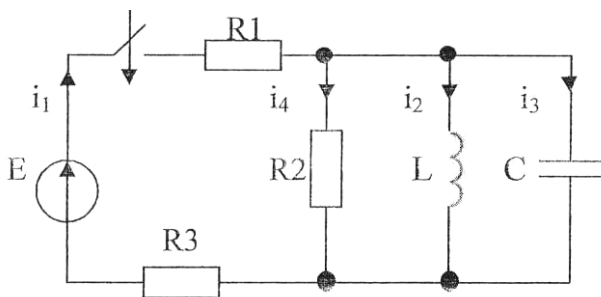


Рисунок 3

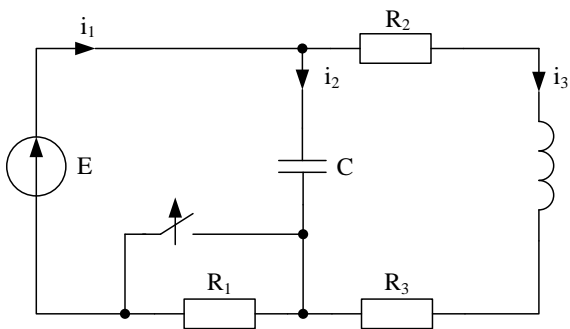


Рисунок 4

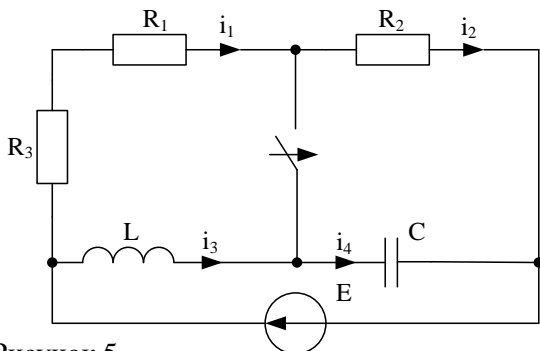


Рисунок 5

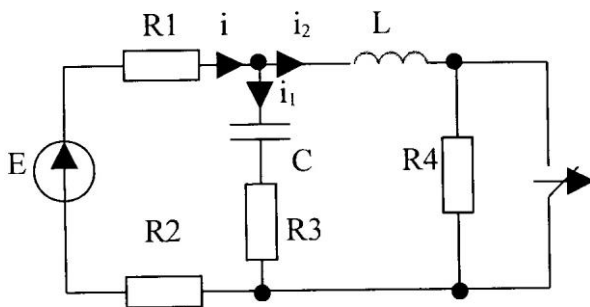


Рисунок 6

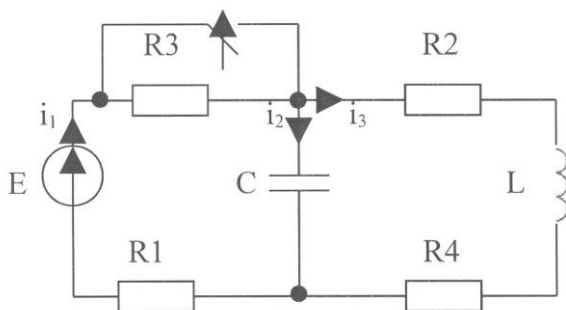


Рисунок 7

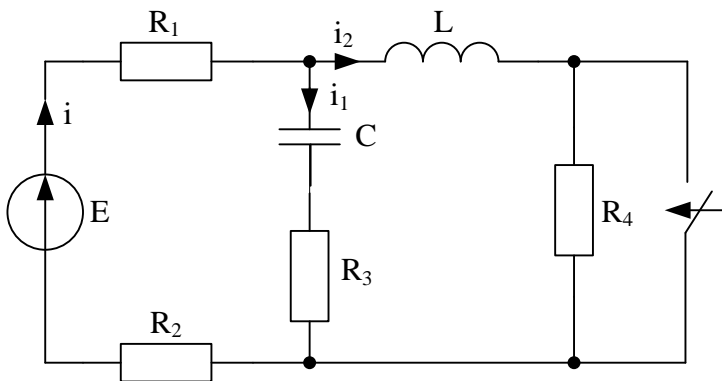


Рисунок 8

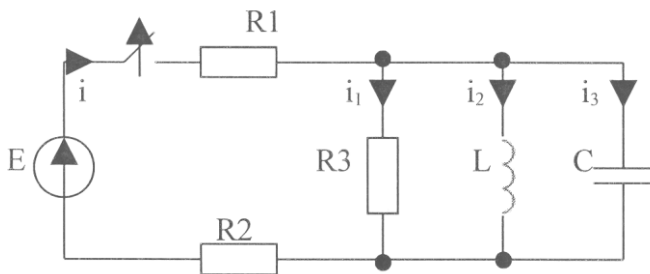


Рисунок 9

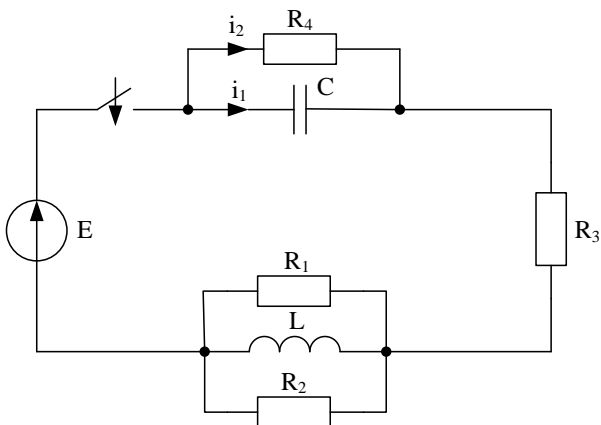


Рисунок 10

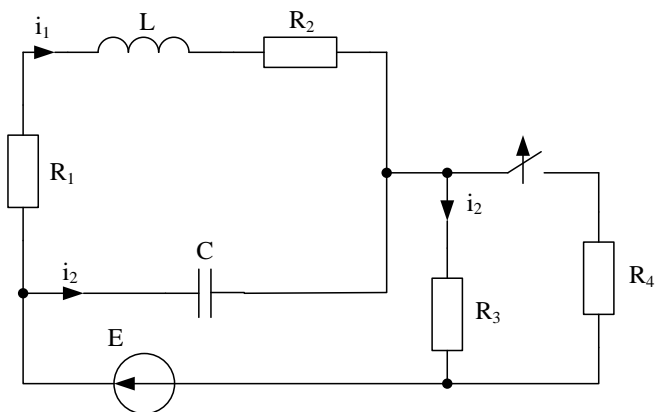


Рисунок 11

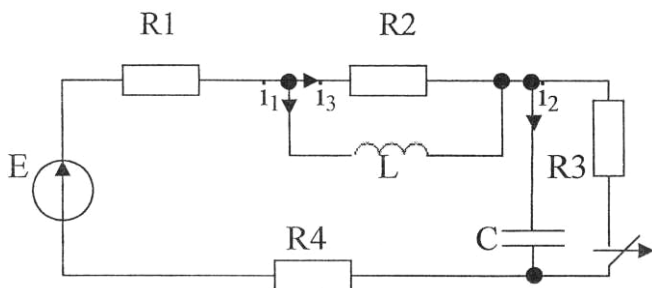


Рисунок 12

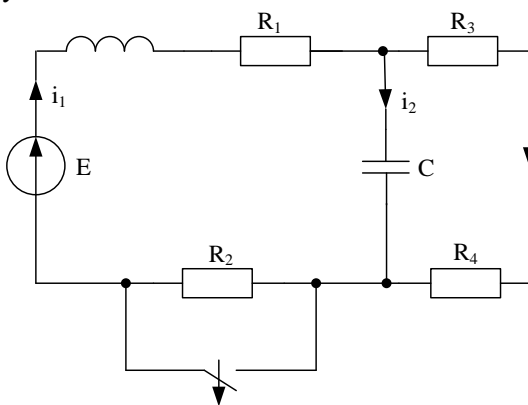


Рисунок 13

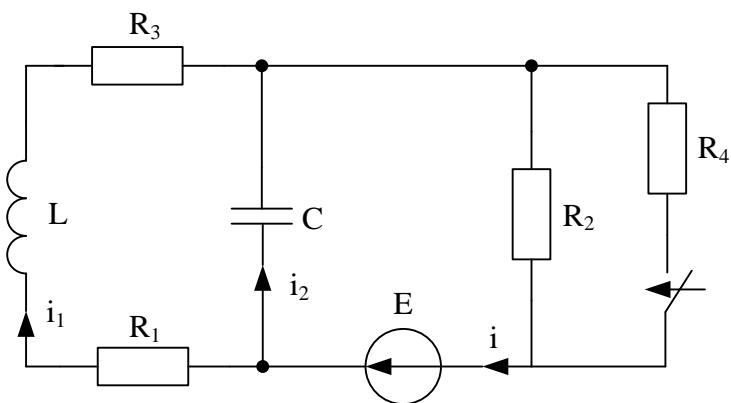


Рисунок 14

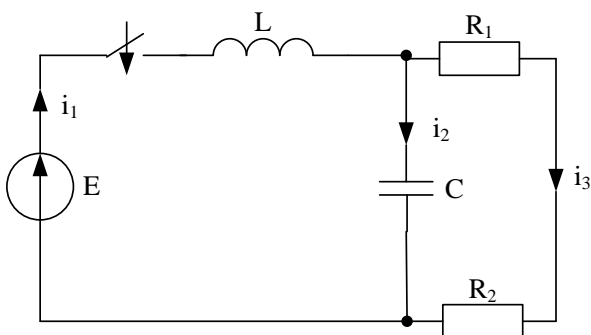


Рисунок 15

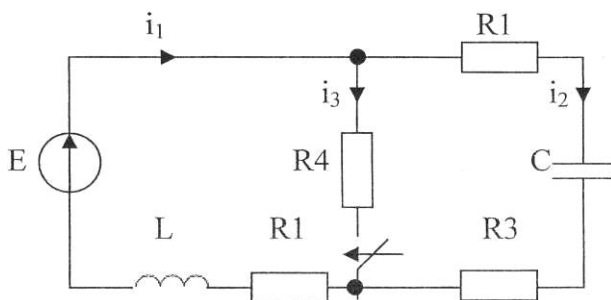


Рисунок 16

Номер варианта	Номер рисунка	R 1	R 2	R 3	R 4	E	C	L	Требуется опре- делить
		Ом				В	мкФ	мГ	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	8	10	5	2	150	5	2	i_1
2	15	2	2	--	-	100	10	1	i_1
3	8	3	0	1	1	120	10	1	i_1
4	3	2	8	6	-	100	50	5	i_1
5	1	2	13	1	4	50	1500	1	i_1
6	4	50	25	25	-	100	10	1	U_c
7	14	10	20	10	20	300	4	5	U_c
8	16	20	4	16	2	100	10	1	U_{R1}
9	12	6	10	5	4	150	5	4	U_c
10	5	10	10	10	-	30	2,5	1	U_c
11	6	100	0	50	100	200	10	10	i_1
12	9	10	10	4	-	100	10	1	i_1
13	13	1	2	1	5	50	1670	2	i_1
14	10	8	8	8	4	120	10	1	i_1
15	7	10	20	50	20	200	10	1	i_1
16	11	2	8	10	10	50	100	1	i_1
17	2	5	10	5	5	150	5	2	i_2
18	15	1	3	-	-	100	10	1	i_3
19	8	1	2	1	1	120	10	1	i_2
20	3	3	8	5	-	100	50	5	U_c

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
21	1	2	13	2	3	50	1500	1	i_2
22	4	50	20	30	-	100	10	1	U_L
23	14	15	20	5	20	300	4	5	i_2
24	16	20	17	3	2	100	10	1	i_1
25	12	9	10	5	1	150	5	4	U_L
26	5	5	10	15	-	30	2,5	1	i_3
27	6	50	50	50	100	200	10	10	U_{R2}
28	9	5	15	4	-	100	10	1	U_L
29	13	1	2	2	4	50	1670	2	i_2
30	10	12	6	8	4	120	10	1	i_3
31	7	10	10	50	30	200	10	1	i_3
32	11	3	7	10	10	50	100	1	i_2
33	2	4	10	5	6	150	5	2	i_3
34	15	1,5	2,5	-	-	100	10	1	i_2
35	8	2	1	1	1	120	10	1	U_{R3}
36	3	6	8	2	-	100	50	5	i_3
37	1	2	13	3	2	50	1500	1	U_L
38	4	50	10	40	-	100	10	1	i_2
39	14	3	20	17	20	300	4	5	i
40	16	20	8	12	2	100	10	1	U_L
41	12	0	10	5	10	150	5	4	i_1

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
42	5	15	10	5	-	30	2,5	1	i_2
43	6	25	75	50	100	200	10	10	U_c
44	9	10	5	4	-	100	10	1	i_2
45	13	1	2	3	3	50	100	2	i_2
46	10	24	4,8	8	4	120	10	1	i_2
47	7	10	25	50	15	200	10	1	i_3
48	11	4	6	10	10	50	100	1	i_3
49	2	7	10	5	3	150	5	2	U_L
50	15	3	1	-	-	100	10	1	U_L
51	8	1,5	1,5	1	1	120	10	1	U_L
52	3	1	8	7	-	100	50	5	i_2
53	1	2	13	4	1	50	1500	1	U_c
54	4	50	30	20	-	100	10	1	i
55	14	6	20	14	20	300	4	5	U_L
56	16	20	11	9	2	100	10	1	U_c
57	12	3	10	5	7	150	5	4	i_2
58	5	12	10	8	-	30	2,5	1	i_2
59	6	0	100	50	100	200	10	10	U_L
60	9	7	13	4	-	100	10	1	i_2
61	13	1	2	4	2	50	1670	2	U_c
62	10	6	12	8	4	120	10	1	U_L

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
63	7	10	30	50	10	200	10	1	U_L
64	11	5	5	10	10	50	100	1	U_L
65	5	10	10	5	-	150	5	2	U_c
66	15	4	0	-	-	100	10	1	U_c
67	8	0	3	1	1	120	10	1	U_c
68	3	4	8	4	-	100	50	5	U_L
69	1	2	13	5	0	50	1500	1	U_{R1}
70	4	50	35	15	-	100	10	1	i_2
71	14	4	20	16	20	300	4	5	U_{R1}
72	16	20	13	7	2	100	10	1	i_2
73	12	2	10	5	8	150	5	4	U_{R1}
74	5	8	10	12	-	30	2,5	1	U_L
75	6	75	25	50	100	200	10	10	i_2
76	9	13	7	4	-	100	10	1	U_c
77	13	1	2	5	1	50	1670	2	U_{R1}
78	16	8	8	8	4	120	10	1	U_L
79	7	10	18	50	22	200	10	1	U_c
80	11	6	4	10	10	50	100	1	U_c

3 Пример расчета переходного процесса в линейной электрической цепи

Для электрической цепи (рисунок 3.1), определить после коммутации токи: $i_1(t)$, $i_2(t)$, $i_3(t)$, напряжение $U_L(t)$ и $U_c(t)$, если па-

параметры цепи: $L = 20\text{мГ}$, $C = 200\text{мкф}$, $R_1 = R_4 = 10\text{ Ом}$, $R_2 = 30\text{ Ом}$, $R_3 = 20\text{ Ом}$. Источник питания постоянная $E = 100\text{В}$.

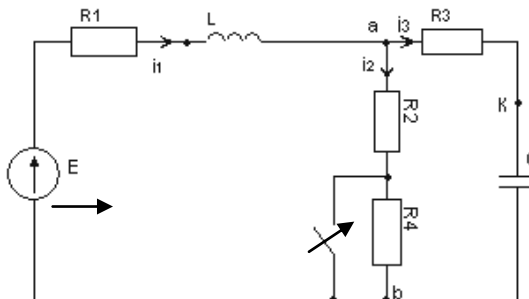


Рисунок 3.1– Расчётная схема

3.1 Расчёт классическим методом

3.1.1 Рассчитываем цепь до замыкания ключа и определяем ток через индуктивность $i_{1(0-)}$ и напряжение на ёмкости $U_{c(0-)}$. Т.к. $E = \text{const}$, то $U_{L(0-)} = L \cdot (di_1/dt) = 0$ $i_{3(0)} = C \cdot (dU_c/dt) = 0$. Следовательно, по первому закону Кирхгофа

$$i_{1(0-)} = i_{2(0-)}.$$

По второму закону Кирхгофа :

$$i_{2(0-)}(R_2 + R_4) + L \cdot (di_{1(0-)} / dt) + R_1 i_{1(0-)} - E = 0 \quad (3.1)$$

$$\text{Отсюда } i_{1(0-)} = E / (R_1 + R_2 + R_4) = 100 / (10 + 30 + 10) = 2\text{А} \quad (3.2)$$

Напряжение на ёмкости определим из уравнения по второму закону Кирхгофа

$$U_{c(0-)} = i_{2(0-)}(R_2 + R_4) - i_{3(0-)}R_3 = 2(30 + 10) = 80\text{В} \quad (3.3)$$

3.1.2 На основании законов коммутации определяем независимые начальные условия

$$i_{1(0+)} = i_{1(0-)} = 2\text{А}; \quad (3.4)$$

$$U_{c(0+)} = U_{c(0-)} = 80\text{В}. \quad (3.5)$$

3.1.3 После коммутации (ключ замыкается) сопротивление R_4 закорачивается (рисунок 3.2). Определим токи и напряжения для нового энергетического состояния в установившемся режиме.

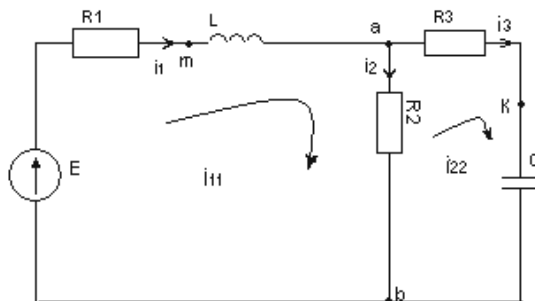


Рисунок 3.2 – Схема после коммутации

Напряжение на индуктивности $U_{Lnp}=0$ и

$$i_{1np} = i_{2np} = E/(R_1 + R_2) = 100/(10 + 30) = 2.5 \text{ A}; \quad (3.6)$$

$$U_{сnp} = i_2 R_2 = 2.5 \cdot 30 = 75 \text{ В}. \quad (3.7)$$

Все найденные значения принуждённых токов и напряжений заносим в таблицу 3.1.

3.1.4 Характеристическое уравнение получается из условия, когда знаменатель дроби при определении свободных токов или напряжений равен нулю. Это вытекает из того, что в источнике тока и ЭДС свободные составляющие отсутствуют. Тогда свободные токи и напряжения имеют место только в том случае, если знаменатель дроби равен нулю, т.е. имеет место неопределённость типа 0/0.

Следовательно, характеристическое уравнение можно получить, используя любой метод расчёта эл.цепей (на основании законов Кирхгофа, контурных токов, узловых напряжений, эквивалентирования схемы к одному сопротивлению и т. д.).

Выведем характеристическое уравнение, используя в первом случае метод контурных токов, во втором – входное сопротивление относительно входной ветви.

Запишем уравнения контурных токов для схемы изображённой на рисунке 3.2. (Характеристическое уравнение выводится только из послекоммутационной схемы).

$$\begin{aligned} i_{св11}(R_1 + R_2) + L(di_{св11}/dt) - i_{св22}R_2 &= 0; \\ -i_{св11}R_2 + i_{св22}(R_2 + R_3) + (1/C)\int i_{св22}dt &= 0. \end{aligned} \quad (3.8)$$

Алгебраизируем уравнение

$$\left. \begin{aligned} i_{CB11}(R_1+R_2+PL)-i_{CB22}R_2 &= 0, \\ -i_{CB11}R_2+i_{CB22}(R_2+R_3+1/CP) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

Определитель системы равен

$$\Delta = \begin{vmatrix} R_1+R_2+PL & -R_2 \\ -R_2 & R_2+R_3+1/CP \end{vmatrix} \quad (3.10)$$

Положив $\Delta = 0$, имеем характеристическое уравнение

$$(R_2+R_3)LCP^2 + [C(R_1R_2+R_1R_3+R_2R_3)+L]P + (R_1+R_2) = 0. \quad (3.11)$$

То же характеристическое уравнение получим, если разорвём любую ветвь схемы (рисунок 3.2 – схема послекоммутационная) и запишем входное сопротивление для переменного синусоидального тока. Для примера разомкнём ветвь с ёмкостью (рисунок 3.3)

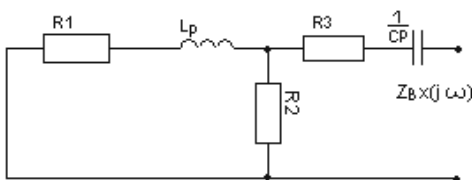


Рисунок 3.3 – Схема получения операторного сопротивления

$$Z_{BX}(j\omega) = R_3 + 1/j\omega C + (R_1 + j\omega L)R_2 / (R_1 + j\omega L + R_2).$$

Заменяв $j\omega = P$, приравняв $Z_{BX}(P) = 0$, получим уравнение 3.11. Подставим в 3.11 значение параметров, имеем квадратное уравнение : $2 \cdot 10^{-4} p^2 + 0,24p + 40 = 0$, корни которого: $P_1 = -200c^{-1}$ и $P_2 = -1000c^{-1}$

3.1.5 Ввиду того, что корни характеристического уравнения действительные, отрицательные, неравные, свободная составляющая тока(напряжения) определяется из уравнения вида: $i_{CB}(t) = A_{1e}^{P_1 t} + A_{2e}^{P_2 t}$, а переходный ток (напряжение)

$$i(t) = i_{np} + i_{CB}(t) = i_{np} + A_1 e^{P_1 t} + A_2 e^{P_2 t}. \quad (3.12)$$

Т.к 3.12 содержит две постоянные интегрирования, для их нахождения необходимо уравнение, которое получают из 3.12 путём взятия производной

$$di(t)/dt = i'(t) = i'_{np} + P_1 A_1 e^{P_1 t} + P_2 A_2 e^{P_2 t}. \quad (3.13)$$

3.1.6 Постоянные интегрирования A_1 и A_2 находятся из начальных условий, для момента времени $t = 0$ из уравнений 3.12 и 3.13 получим:

$$\left. \begin{aligned} i_{(0+)} &= i_{np(0+)} + A_1 + A_2, \\ i_{(0+)} &= P_1 A_1 + P_2 A_2. \end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

(производная принуждённого тока в данном случае равна нулю, т.к. к схеме приложено постоянное напряжение).

В уравнениях 3.14 неизвестными являются A_1 и A_2 , а так же $i'_{(0+)}$. Последнюю величину необходимо получить из других уравнений. В первую очередь из уравнений

$$\left. \begin{aligned} u_L(t) &= L(di/dt), \\ i_c(t) &= C(du/dt). \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

Получим производные тока через индуктивность и напряжения на ёмкости в момент времени $t = 0$

$$\left. \begin{aligned} di/dt_{(0+)} &= U_{L(0+)}/L, \\ du_{(0+)}/dt &= i_{c(0+)}/C. \end{aligned} \right\} \quad (3.16)$$

В свою очередь напряжение на индуктивности и ток через ёмкость в момент времени $t = 0$ получим из послекоммутационной схемы, с учётом законов коммутации.

Составим систему уравнений по I и II законам Кирхгофа для после коммутационной схемы (рисунок 3.2)

$$\left. \begin{aligned} i_{1(0+)} &= i_{3(0+)} + i_{2(0)}, \\ i_{3(0+)} \cdot R_3 + U_{c(0+)} - i_{2(0+)} \cdot R_2 &= 0, \\ i_{1(0+)} \cdot R_1 + U_{L(0+)} + i_{2(0+)} \cdot R_2 &= E. \end{aligned} \right\} \quad (3.17)$$

Из 1 уравнения выразим $i_{2(0+)}$

$$i_{2(0+)} = i_{1(0+)} - i_{3(0+)}.$$

Из 2 уравнения найдем $i_{3(0+)}$ через ёмкость

$$i_{3(0+)} \cdot R_3 + U_{c(0+)} - i_{1(0+)} = 0;$$

$$i_{3(0+)} = \frac{-U_c + i_{1(0+)} \cdot R_2}{R_2 + R_3} = \frac{-80 + 2 \cdot 30}{30 + 20} = -0,4(A);$$

$$i_{2(0+)} = 2 - (-0,4) = 2,4A.$$

Напряжение на индуктивности $U_{L(0+)}$ найдём из 3 уравнения системы 3.17

$$U_{L(0+)} = E - i_{2(0+)} \cdot R_2 - i_{1(0+)} \cdot R_1 = 100 - 2,4 \cdot 30 - 2 \cdot 10 = 8V. \quad (3.18)$$

Полученные данные занесём в таблицу 3.1

3.1.7 Определим значение производных токов и напряжений в момент коммутации $t(0)$. Прежде всего найдём

$$i'_{1(0+)} = U_{L(0+)}/L = 8/(20 \cdot 10^{-3}) = 400A/c; \quad (3.19)$$

$$U'_{c(0+)} = i_{3(0+)}/C = -0,4/(200 \cdot 10^{-6}) = -2000 B/c. \quad (3.20)$$

Для определения оставшихся производных продифференцируем систему 3.17, учитывая, что производная от постоянной E равна 0.

$$\left. \begin{aligned} i'_{1(0+)} &= i'_{3(0+)} + i'_{2(0+)}, \\ i'_{3(0+)} \cdot R_3 + U'_{c(0+)} - i'_{2(0+)} \cdot R_2 &= 0, \\ i'_{1(0+)} \cdot R_1 + U'_{L(0+)} + i'_{2(0+)} \cdot R_2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3.21)$$

Решая систему (3.21) с учётом значений $i'_{1(0+)} = 400A/c$ и $U'_{c(0+)} = -2000 B/c$ находим остальные производные

$$i'_{2(0+)} = i'_{1(0+)} - i'_{3(0+)} = 400 - i'_{3(0+)};$$

$$i'_{3(0+)} \cdot R_3 + (-2000) - (400 - i'_{3(0+)}) \cdot R_2 = 0.$$

отсюда

$$i_{3(0+)} = \frac{-U'_{c(0+)} + i'_{1(0+)} \cdot R_2}{R_3 + R_2} = \frac{2000 + 400 \cdot 30}{20 + 30} = 280(A/c).$$

Аналогично находим и остальные производные

$$i'_{2(0+)} = 120A/c \quad U'_{L(0+)} = -7600 B/c.$$

Полученные результаты заносим в таблицу 3.1

Таблица 3.1 – Токи и напряжения послекоммутационной схемы

	I_1	I_2	I_3	U_c	U_L
Принуждённая составляющая	2,5A	2,5A	0	75B	0
Значение в момент $t = (0+)$	2A	2,4A	-0,4A	80B	8B
Значение производной в $t = (0+)$	400 A/c	120 A/c	280 A/c	-2000 B/c	-7600 B/c

3.1.8 Определяем из системы 3.14 постоянные интегрирования A_1 и A_2 для каждого тока и напряжения, подставляя данные из таблицы 3.1 в 3.2. Записываем переходные токи и напряжения.

Определяем ток $i_1(t)$

$$2 = 2,5 + A_1 + A_2;$$

$$400 = -200A_1 - 1000A_2;$$

Отсюда

$$A_1 = -0,125A; \quad A_2 = -0,375A;$$

$$i_1(t) = 2,5 - 0,125e^{-200t} - 0,375e^{-1000t} A.$$

Определяем ток $i_2(t)$

$$2,4 = 2,5 + A_1 + A_2;$$

$$120 = -200A_1 - 1000A_2.$$

$$\text{Отсюда} \quad A_1 = 0,025A; \quad A_2 = -0,125A;$$

$$i_2(t) = 2,5 + 0,025e^{-200t} - 0,125e^{-1000t} A.$$

Определяем ток $i_3(t)$

$$-0,4 = A_1 + A_2$$

$$280 = -200A_1 - 1000A_2.$$

$$\text{Отсюда} \quad A_1 = -0,15A;$$

$$A_2 = -0,25A; \quad i_3(t) = -0,15e^{-200t} - 0,25e^{-1000t} A.$$

Определяем напряжение $U_c(t)$

$$80 = 75 + A_1 + A_2;$$

$$-2000 = -200A_1 - 1000A_2.$$

Отсюда $A_1 = 3,75\text{В};$
 $A_2 = 1,25\text{В}; \quad U_c(t) = 75 + 3,75e^{-200t} + 1,25e^{-1000t} \text{ В}.$

Определяем напряжение $U_L(t)$
 $8 = A_1 + A_2; \quad -7600 = -200A_1 - 1000A_2;$

Отсюда $A_1 = 0,5\text{В}; \quad A_2 = 7,5\text{В};$
 $U_L(t) = 0,5e^{-200t} + 7,5e^{-1000t} \text{ В};$

3.1.9 Построим график переходного процесса для тока $i_3(t)$:
 $i_3(t) = -0,15e^{-200t} - 0,25e^{-1000t}.$

Значение тока переходного процесса удобнее откладывать на графике через интервал времени, равный постоянной времени, которая в свою очередь в случае апериодических процессов определяется как обратная величина модуля корня характеристического уравнения: $T = |1/P| \text{ с}$

Так как переходный ток $i_3(t)$ равен сумме двух экспонент, то каждая составляющая тока будет иметь свою постоянную времени, причём $|P_1| < |P_2|$; следовательно: $T_1 > T_2$ В нашем случае:

$$T_1 = 1/200 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \quad T_2 = 1/1000 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

Если представить: $A_1 e^{p_1 t} = A_1 e^{-t/T} = A_1 / e^{t/T},$

то из этого равенства видно, что через интервал времени, равный T значение составляющей уменьшается в “е” раз (в 2,72 раза). Для построения графика переходного тока $i_3(t)$ рассчитываем ординаты составляющей $-0,15e^{-200t}$ через $\Delta t = \tau_1 = 5 \text{ мС}$, а ординаты составляющей $-0,25e^{-1000t}$ через $\Delta t = \tau_2 = 1 \text{ мС}$. Результаты расчёта сводим в таблицу 3.2, по которым построим график переходного процесса на рисунке 3.4.

Таблица 3.2 Результаты расчёта для построения графика переходного процесса

$-0,15e^{-200t}$		$-0,25e^{-1000t}$	
t(мс)	Ток(А)	t(мс)	Ток(А)
0	-0,15	0	-0,25
5	-0,055	1	-0,092
10	-0,02	2	-0,034
15	-0,0075	3	-0,12
20	-0,0028	4	-0,0046
		5	0

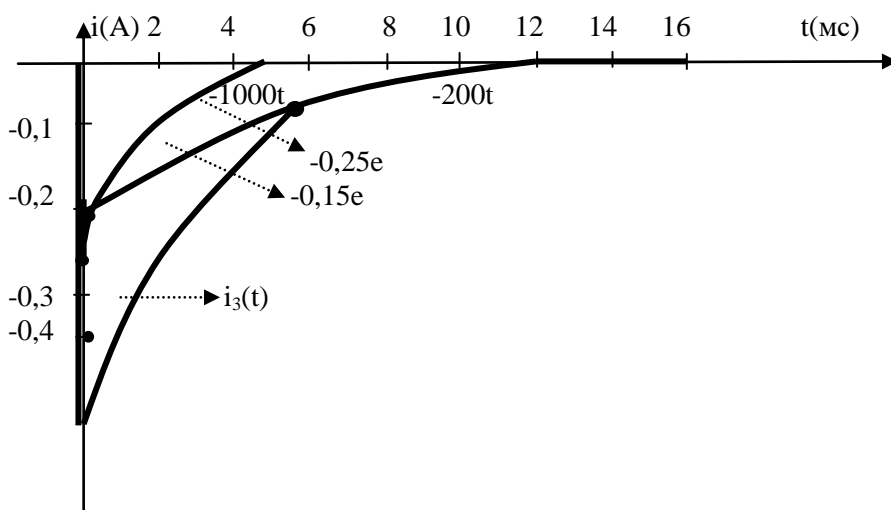


Рисунок 3.4 – График переходного процесса

3.2 Расчёт переходных процессов операторным методом

На примере схемы рисунок 3.5 рассмотрим расчёт переходного процесса и определим ток $i_2(t)$ методом двух узлов, а ток $i_1(t)$ методом контурных токов, для определения остальных токов и напряжений запишем выражения в операторной форме.

Независимые начальные условия были определены в классическом методе и равны:

$$i_{1(0)} = i_{1(0+)} = i_{1(0-)} = 2\text{A}; \quad U_{c(0+)} = U_{c(0-)} = 80\text{V}. \quad (3.21)$$

3.2.1 В режиме после коммутации с учётом ненулевых начальных условий составляем операторную схему (рисунок 3.5).

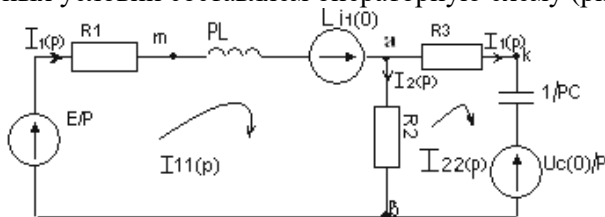


Рисунок 3.5 – Операторная схема.

Схема содержит два узла а и в и два контура.

Ток $i_2(t)$ можно определить как $I_2(p) = U_{ав}(p)/R_2$.

В свою очередь методом двух узлов определим $U_{ав}(p)$

$$U_{ав}(p) = \frac{\left(\frac{E}{P} + Li_{1(0)} \right) \cdot \frac{1}{R_1 + PL} + \left(\frac{U_{c(0)}}{P} \cdot \frac{1}{R_3 + \frac{1}{CP}} \right)}{\frac{1}{R_1 + PL} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3 + \frac{1}{CP}}}. \quad (3.22)$$

С целью упрощения преобразования в 3.22 подставим все числовые значения кроме L и C, и приведём дробь к виду, когда в числителе и знаменателе будет по одной строке. При этом следует обращать внимание на то обстоятельство, что при приведении числителя и знаменателя выражение 3.22 каждого к своему общему знаменателю не следует раскрывать скобки. Это позволит упрощать выражение. Действительно

$$U_{AB}(p) = \frac{\left(\frac{E}{P} + Li_{(0)}\right) \cdot P \cdot \left(R_3 + \frac{1}{PC}\right) + U_{c(0)} \cdot (R_1 + PL) \cdot P \cdot (R_1 + PL) \cdot R_2(R_1 + LP) \cdot \left(R_3 + \frac{1}{PC}\right) \cdot R_2 \left(R_3 + \frac{1}{PC}\right) + (R_1 + PL) \cdot \left(R_3 + \frac{1}{PC}\right) + R_2(R_1 + PL)}{\left(R_3 + \frac{1}{PC}\right)}$$

Откуда видно, что сокращаются выражения $(R_1 + PL)(R_3 + 1/PC)$. После преобразования получаем

$$U_{ав}(p) = \frac{3600CLP^2 + 84000CP + 60LP + 3000}{P \cdot (50CLP^2 + 1100 + LP + 40)}$$

Изображение тока $I_2(p)$ будет равно

$$I_2(p) = \frac{U_{AB}(p)}{R_2} = \frac{120CLP^2 + 2800CP + 2LP + 100}{P \cdot (50CLP^2 + 1100 + LP + 40)}. \quad (3.23)$$

После подстановки значения L и C

$$I_2(p) = \frac{48 \cdot 10^{-5} \cdot P^2 + 0,6P + 100}{P \cdot (2 \cdot 10^{-4} P^2 + 0,24P + 40)} = \frac{F_1(p)}{F_2(p)}. \quad \text{Переходим от}$$

изображения тока $I_2(p)$ к оригиналу $i_2(t)$, используя формулу разложения. Приравниваем $F_2(p) = 0$ и определяем корни уравнения.

$$F_2(p) = P(2 \cdot 10^{-4} p^2 + 0,24p + 40) = 0 \quad \Rightarrow \\ P_1 = 0; \quad P_2 = -200e^{-1}; \quad P_3 = 1000e^{-1}.$$

Находим производную знаменателя

$$F_2'(p) = 6 \cdot 10^{-3} p^2 + 0,48p + 40. \quad (3.24)$$

Подставим в 3.24 каждый корень

$$F_2(p_1) = 40; \quad F_2'(p_2) = 6 \cdot 10^{-4} (-200)^2 + 0,48(-200) + 40 = -32; \\ F_2'(p_3) = 6 \cdot 10^{-4} (-1000)^2 + 0,48(-1000) + 40 = 160.$$

Подставляя корни P_1, P_2, P_3 в числитель дроби 2.23а, получаем

$$F_1(P_1) = 100;$$

$$F_1(P_2)=48 \cdot 10^{-5}(-200)^2+0,6(-200)+100=0,8;$$

$$F_1(P_3)=48 \cdot 10^{-5}(-1000)^2+0,6(-1000)+100=-20;$$

Оригинал тока $i_2(t)$ определяется так

$$I_2(t)=(F_1(p_1)/F_2'(P_1))e^{P_1 t}+(F_1(P_2)/F_2'(P_2))e^{P_2 t}+ \\ +(F_1(P_3)/F_2'(P_3))e^{P_3 t}. \quad (3.25)$$

Или после подстановки

$$I_2(t)=(100/40)e^{0t}+(-0,8/-32)e^{-200t}+(-20/160)e^{-1000t}=2,5+ \\ +0,025e^{-200t}-0,125e^{-1000t}.$$

Изображения остальных токов и напряжений определяем, используя изображения напряжения

$$I_1(p) = (-U_{ав}(p)+E/p+Li_1(0))/(R_1+LP); \quad (3.26)$$

$$I_3(p) = (U_{ав}(p)-U_c(0))/(R_3+1/CP); \quad (3.27)$$

$$U_L(p) = LPI_1(p)-Li_1(0+); \quad (3.28)$$

$$U_c(p) = (1/PC)*I_3(p)+U_c(0)/p. \quad (3.29)$$

Токи $I_1(p)$ и $I_3(p)$ можно определить методом контурных токов, задав контуры, как показано на рисунке 3.5

$$I_1(p) = I_{11}(p) = \Delta_1(p)/\Delta(p); \quad (3.30)$$

$$I_3(p) = I_{22}(p) = \Delta_2(p)/\Delta(p). \quad (3.31)$$

Составим уравнения контурных токов

$$I_{11}(p)(R_1+R_2+PL)-I_{22}(p)R_2 = E/p+Li_1(0);$$

$$-I_{11}(p)R_2+I_{22}(p)(R_2+R_3+1/CP) = -U_c(0)/P.$$

Определители равны:

$$\Delta(p) = \begin{vmatrix} R_1+R_2+PL & -R_2 \\ -R_2 & R_2+R_3+1/PC \end{vmatrix} = \\ = (R_1+R_2)(R_2+R_3)+((R_1+R_2)/CP)+(R_2+R_3)PL+L/C-R_2^2;$$

$$\Delta_1(p) = \begin{vmatrix} E/P+Li_1(0) & -R_2 \\ -U_c(0)/P & R_2+R_3+1/PC \end{vmatrix} = \\ = (E(R_2+R_3)/p)+(E/p^2c)+L_i(0)(R_2+R_3)+(L_i(0)/CP)-U_c(0)R_2/P;$$

$$\Delta_2(p) = \begin{vmatrix} R_1 + R_2 PL & E(p) + Li_1(0) \\ -R_2 & -U_c(0)/P \end{vmatrix} \neq 0$$

$$= U_c(0)((R_1 + R_2)/p) + U_c(0)L + (ER_2/P) + Li_1(0)R_2;$$

Определим ток $I_1(p)$

$$I_1(p) = \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} = \frac{4 \cdot 10^{-4} p^2 + 0,56p + 100}{P(2 \cdot 10^{-4} p^2 + 0,24p + 40)} = \frac{F_1(p)}{F_2(p)}. \quad (3.32)$$

Знаменатель дроби 3.32 тот же, что и в 3.23, поэтому $N'(pk)$ можно взять из предыдущего расчёта

$$F_1(p) = 4 \cdot 10^{-4} p^2 + 0,56p + 100. \quad (3.33)$$

Подставляем в 3.32 корни P_1, P_2, P_3 имеем

$$F_1(p_1) = 100;$$

$$M(p_2) = 4 \cdot 10^{-4}(-200)^2 + 0,56(-200) + 100 = 4;$$

$$M(p_3) = 4 \cdot 10^{-4}(-1000)^2 + 0,56(-1000) + 100 = -60.$$

Оригинал тока $i_1(t)$ определяется как

$$i_1(t) = \frac{F_1(p_1)}{F'_2(p_1)} \cdot e^{p_1 t} + \frac{F_1(p_2)}{F'_2(p_2)} \cdot e^{p_2 t} + \frac{F_1(p_3)}{F'_2(p_3)} \cdot e^{p_3 t}. \quad (3.34)$$

Или после подстановки

$$\begin{aligned} i_1(t) &= (100/40)e^{0t} + (4/-32)e^{-200t} + (-60/160)e^{-1000t} = \\ &= 2,5 - 0,125e^{-200t} - 0,375e^{-1000t}. \end{aligned}$$

Достоверность полученных результатов подтверждается сопоставлением расчётов переходных процессов классическим и операторным методами.