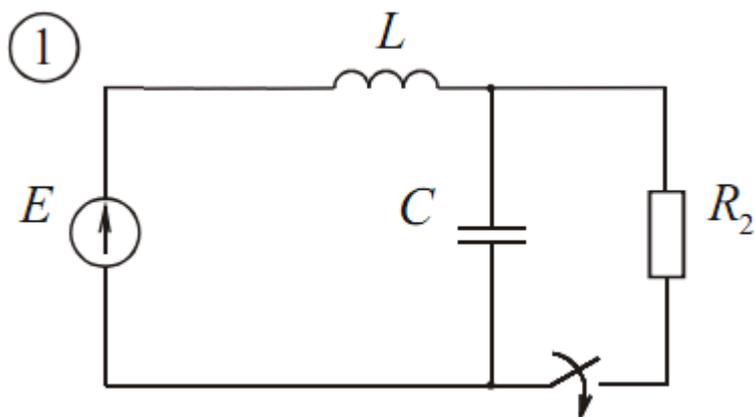


Расчет переходного процесса в разветвленной цепи

Заданы параметры цепи (рис. №1)

Таблица 1 данные №2



$$L = 800 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

$$C = 400 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

$$R_2 = 290 \text{ Ом}$$

$$E = 500 \text{ В}$$

$$i_C(t), u_C(t), i_L(t), u_L(t) - ?$$

1 Расчет переходного процесса классическим методом

1.1 Определение основных начальных условий

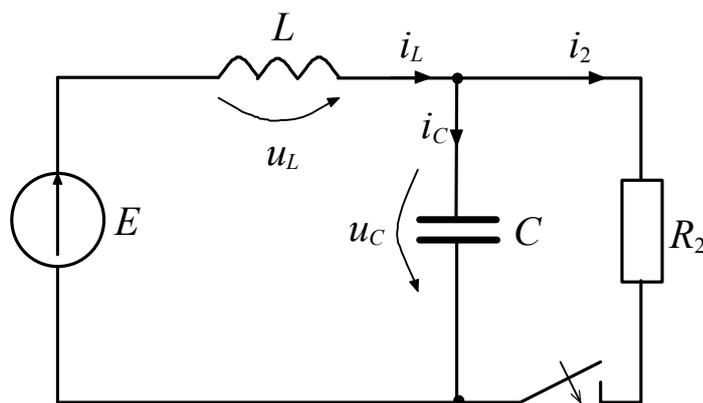


Рис. 1

Основными начальными условиями являются значение тока в индуктивности и значение напряжения на емкости в первый момент после коммутации. Они равны их значениям до коммутации

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

$$u_C(0+) = u_C(0-).$$

Исходя из того, что до коммутации режим был установившийся (рис. 2) и для идеальных C и L при установившемся режиме

$$i_C(0-) = 0;$$

$$u_L(0-) = 0.$$

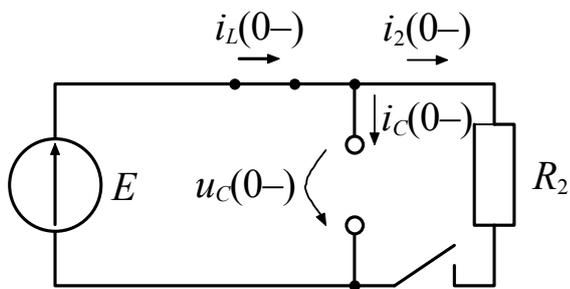


Рис. 2

Имеем

$$i_L(0-) = 0;$$

$$i_2(0-) = 0;$$

$$u_C(0-) = E.$$

Откуда по законам коммутации

$$i_L(0) = 0; \tag{1}$$

$$u_C(0) = E. \tag{2}$$

1.2 Определение неосновных начальных условий

Запишем уравнения Кирхгофа для послекоммутационного режима (рис. 3).

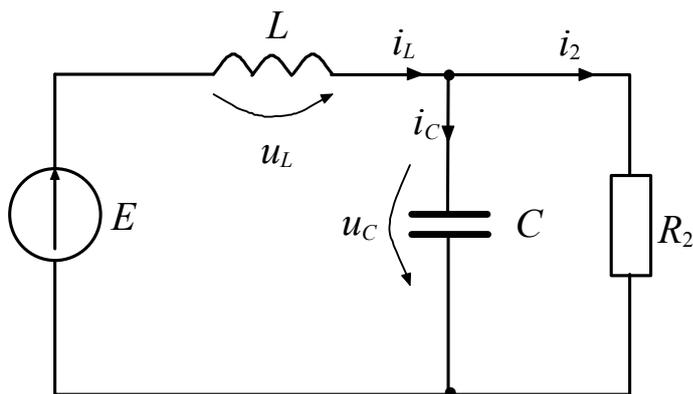


Рис. 3

$$i_2 + i_C = i_L \quad \left| \quad i_2(0) + i_C(0) = i_L(0) \tag{3}$$

$$u_L + u_C = E \quad \left| \quad u_L(0) + u_C(0) = E \tag{4}$$

$$i_2 \cdot R_2 = u_C \quad \left| \quad i_2(0) \cdot R_2 = u_C(0) \tag{5}$$

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} \quad \left| \quad i_C(0) = C \frac{du_C}{dt} \Big|_{t=0} \tag{6}$$

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} \quad \left| \quad u_L(0) = L \frac{di_L}{dt} \Big|_{t=0} \tag{7}$$

Из уравнений (3) – (5) находим

$$i_2 = \frac{u_C}{R_2} \quad (8)$$

$$i_C = i_L - i_2 = i_L - \frac{u_C}{R_2} \quad (9)$$

$$u_L = E - u_C \quad (10)$$

Из уравнений (1) – (10) находим начальные условия для токов и напряжений на емкости и индуктивности.

Начальные условия для тока через катушку индуктивности

$$\begin{cases} i_L(0) = 0 \\ \left. \frac{di_L}{dt} \right|_{t=0} = \frac{u_L(0)}{L} = \frac{1}{L}(E - u_C(0)) = \frac{1}{L}(E - E) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

Начальные условия для напряжения на конденсаторе

$$\begin{cases} u_C(0) = E \\ \left. \frac{du_C}{dt} \right|_{t=0} = \frac{i_C(0)}{C} = \frac{1}{C} \left(i_L(0) - \frac{u_C(0)}{R_2} \right) = \frac{1}{C} \left(0 - \frac{E}{R_2} \right) = -\frac{E}{C \cdot R_2} \end{cases} \quad (12)$$

Дифференцируем (3) и (8)

$$\frac{di_2}{dt} + \frac{di_C}{dt} = \frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{1}{R_2} \frac{du_C}{dt}$$

Откуда

$$\frac{di_C}{dt} = \frac{di_L}{dt} - \frac{di_2}{dt} = \frac{di_L}{dt} - \frac{1}{R_2} \frac{du_C}{dt}$$

В выражение для производной тока на конденсаторе подставим вторые уравнения из (11) и (12)

$$\left. \frac{di_C}{dt} \right|_{t=0} = \left. \frac{di_L}{dt} \right|_{t=0} - \frac{1}{R_2} \left. \frac{du_C}{dt} \right|_{t=0} = 0 - \frac{1}{R_2} \left(-\frac{E}{C \cdot R_2} \right) = \frac{E}{C \cdot R_2^2}$$

Начальные условия для тока конденсатора

$$\begin{cases} i_C(0) = i_L(0) - \frac{u_C(0)}{R_2} = -\frac{E}{R_2} \\ \left. \frac{di_C}{dt} \right|_{t=0} = \frac{E}{C \cdot R_2^2} \end{cases} \quad (13)$$

Дифференцируем (10) с учетом вторых уравнений (11) и (12)

$$\left. \frac{du_L}{dt} \right|_{t=0} = \left. \frac{d}{dt} (E - u_C) \right|_{t=0} = - \left. \frac{du_C}{dt} \right|_{t=0} = - \left(- \frac{E}{C \cdot R_2} \right) = \frac{E}{C \cdot R_2}$$

Начальные условия для напряжения на индуктивности

$$\begin{cases} u_L(0) = E - u_C(0) = E - E = 0 \\ \left. \frac{du_L}{dt} \right|_{t=0} = \frac{E}{C \cdot R_2} \end{cases} \quad (14)$$

1.3 Определение принужденного режима

Определение принужденного режима осуществляется путем расчета цепи после окончания переходного процесса при $t = \infty$ (новый установившийся режим, рис. 4). Для идеальных C и L при новом установившемся режиме

$$i_{Cnp} = 0; \quad (15)$$

$$u_{Lnp} = 0. \quad (16)$$

Откуда

$$i_{Lnp} = i_{2np} = \frac{E}{R_2}; \quad (17)$$

$$u_{Cnp} = i_{2np} R_2 = E. \quad (18)$$

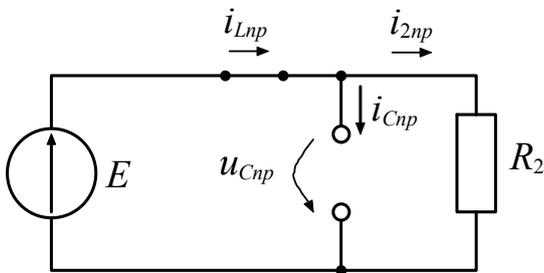


Рис. 4

1.4 Характеристическое уравнение

Запишем выражение для входного сопротивления цепи (рис. 5)

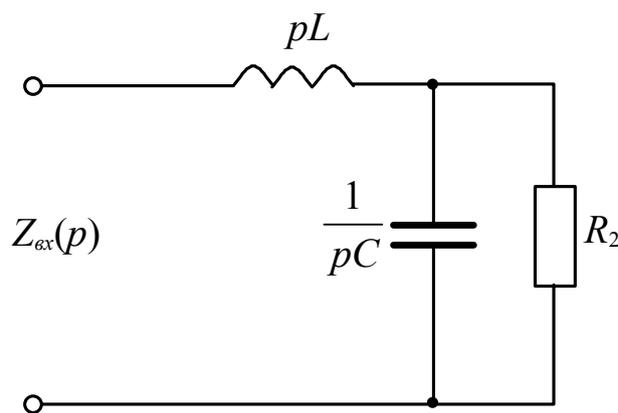


Рис. 5

$$\begin{aligned} Z_{ex}(p) &= Lp + \frac{R_2 \cdot \frac{1}{Cp}}{R_2 + \frac{1}{Cp}} = \\ &= \frac{Lp \cdot (R_2 \cdot C \cdot p + 1) + R_2}{R_2 \cdot C \cdot p + 1}. \end{aligned}$$

Если приравнять полученное выражение нулю, то получится, что числитель равен нулю. Это и будет характеристическим уравнением. Поделив его на коэффициент при p^2 , получим окончательно

$$p^2 + \frac{1}{R_2 C} \cdot p + \frac{1}{LC} = 0. \quad (19)$$

Корни характеристического уравнения (19) вычисляются по формуле

$$p_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}, \quad (20)$$

где

$$\delta = \frac{1}{2} \frac{1}{R_2 C} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{290.4 \times 10^{-4}} = 4.310345 \text{ 1/c}$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC} = \frac{1}{0.8 \cdot 4 \times 10^{-4}} = 3125 \text{ 1/c}^2$$

По формуле (20) находим корни характеристического уравнения

$$p_1 = -\delta + \omega = -4.31 + 55.735j \text{ 1/c};$$

$$p_2 = -\delta - \omega = -4.31 - 55.735j \text{ 1/c}.$$

комплексные. Соответственно, характер процесса будет *колебательным*.

В случае комплексных корней решение системы дифференциальных уравнений (3) – (7) для тока и напряжения записываются в виде

$$i(t) = i_{ce}(t) + i_{np}(t) = Ae^{-\delta t} \sin(\omega t + \beta) + i_{np}; \quad (21)$$

$$u(t) = u_{ce}(t) + u_{np}(t) = Ae^{-\delta t} \sin(\omega t + \beta) + u_{np}.$$

Постоянные интегрирования A и β находим путем подстановки начальных условий в решение системы дифференциальных уравнений (21). Покажем нахождение постоянных интегрирования

$$\left\{ \begin{array}{l} i(0) = A \sin \beta + i_{np} \\ \left. \frac{di}{dt} \right|_{t=0} = -\delta A \sin \beta + \omega A \cos \beta \end{array} \right. \quad \left| \quad \left\{ \begin{array}{l} u(0) = A \sin \beta + u_{np} \\ \left. \frac{du}{dt} \right|_{t=0} = -\delta A \sin \beta + \omega A \cos \beta \end{array} \right. \quad (22)$$

После соответствующих преобразований

$$\left\{ \begin{array}{l} A \sin \beta = i(0) - i_{np} \\ \left. \frac{di}{dt} \right|_{t=0} = -\delta [i(0) - i_{np}] + \omega A \cos \beta \end{array} \right. \quad \left| \quad \left\{ \begin{array}{l} A \sin \beta = u(0) - u_{np} \\ \left. \frac{du}{dt} \right|_{t=0} = -\delta [u(0) - u_{np}] + \omega A \cos \beta \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A \sin \beta = i(0) - i_{np} \\ A \cos \beta = \frac{\left. \frac{di}{dt} \right|_{t=0} + \delta [i(0) - i_{np}]}{\omega} \end{array} \right. \quad \left| \quad \left\{ \begin{array}{l} A \sin \beta = u(0) - u_{np} \\ A \cos \beta = \frac{\left. \frac{du}{dt} \right|_{t=0} + \delta [u(0) - u_{np}]}{\omega} \end{array} \right.$$

получим следующие выражения постоянные интегрирования A и β

$$\left\{ \begin{array}{l} \operatorname{tg} \beta = \frac{\omega [i(0) - i_{np}]}{\left. \frac{di}{dt} \right|_{t=0} + \delta [i(0) - i_{np}]} \\ A = \frac{i(0) - i_{np}}{\sin \beta} \end{array} \right. \quad \left| \quad \left\{ \begin{array}{l} \operatorname{tg} \beta = \frac{\omega [u(0) - u_{np}]}{\left. \frac{du}{dt} \right|_{t=0} + \delta [u(0) - u_{np}]} \\ A = \frac{u(0) - u_{np}}{\sin \beta} \end{array} \right. \quad (23)$$

Получим численные выражения для тока и напряжения конденсатора и катушки индуктивности в виде (21) по формулам (22), (23).

Ток через конденсатор

По формулам (13) находим начальные условия для тока

$$i_C(0) = -\frac{E}{R_2} = -\frac{500}{290} = -1.72414 \text{ A};$$

$$\left. \frac{di_C}{dt} \right|_{t=0} = \frac{1}{C} \frac{E}{R_2^2} = \frac{1}{4 \times 10^{-4}} \cdot \frac{500}{290^2} = 14.8633 \text{ A/c.}$$

По формулам (23) для тока находим постоянные интегрирования

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\omega [i_C(0) - i_{Cnp}]}{\left. \frac{di_C}{dt} \right|_{t=0} + \delta [i_C(0) - i_{Cnp}]} = \frac{55.735 \cdot (-1.72414 - 0)}{14.8633 + 4.310345 \cdot (-1.72414 - 0)} = -12.9305$$

$$\beta = \operatorname{arctg}(-12.9305) = -85.578^\circ$$

$$A = \frac{i_C(0) - i_{Cnp}}{\sin \beta} = \frac{-1.72414 - 0}{\sin(-85.578^\circ)} = 1.7293 \text{ A}$$

Получим

$$i_C(t) = 1.7293 \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega \cdot t - 85.578^\circ) + 0, \text{ A.}$$

Напряжение на конденсаторе

По формулам (14) находим начальные условия для напряжения

$$u_C(0) = E = 500 \text{ В};$$

$$\left. \frac{du_C}{dt} \right|_{t=0} = -\frac{1}{C} \frac{E}{R_2} = -\frac{1}{4 \times 10^{-4}} \cdot \frac{500}{290} = -4.3103 \times 10^3 \text{ В/с.}$$

По формулам (23) для напряжения находим постоянные интегрирования

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\omega [u_C(0) - u_{Cnp}]}{\left. \frac{du_C}{dt} \right|_{t=0} + \delta [u_C(0) - u_{Cnp}]} = \frac{55.735 \cdot (500 - 500)}{-4.3103 \times 10^3 + 4.310345 \cdot (500 - 500)} = 0$$

$$\beta = \operatorname{arctg}(0) = 0^\circ$$

$$A = \frac{u_C(0) - u_{Cnp}}{\sin \beta} = \frac{500 - 500}{\sin(0^\circ)} = \left(\frac{0}{0} \right) - \text{неопределенность.}$$

Постоянную интегрирования A найдем из второго уравнения (22) для напряжения при $\beta = 0$

$$A = \frac{\left. \frac{du}{dt} \right|_{t=0}}{\omega} = \frac{-4.3103 \times 10^3}{55.735} = -77.336 \text{ В.}$$

Получим

$$u_C(t) = -77.336 \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega \cdot t + 0^\circ) + 500, \text{ В.}$$

Ток через катушку индуктивности

По формулам (11) находим начальные условия для тока

$$i_L(0) = 0$$

$$\left. \frac{di_L}{dt} \right|_{t=0} = 0$$

По формулам (23) для тока находим постоянные интегрирования

$$tg\beta = \frac{\omega [i_L(0) - i_{Lnp}]}{\left. \frac{di_L}{dt} \right|_{t=0} + \delta [i_L(0) - i_{Lnp}]} = \frac{55.735 \cdot (0 - 1.7241)}{0 + 4.310345 \cdot (0 - 1.7241)} = 12.9305$$

$$\beta = arctg(12.9305) = 85.578^\circ$$

$$A = \frac{i_L(0) - i_{Lnp}}{\sin\beta} = \frac{0 - 1.7241}{\sin(85.578^\circ)} = -1.7292 \text{ A}$$

Получим

$$i_L(t) = -1.729 \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega \cdot t + 85.578^\circ) + 1.724, \text{ A.}$$

Напряжение на катушке индуктивности

По формулам (14) находим начальные условия для напряжения

$$u_L(0) = 0$$

$$\left. \frac{du_L}{dt} \right|_{t=0} = \frac{1}{C} \frac{E}{R_2} = \frac{1}{4 \times 10^{-4}} \cdot \frac{500}{290} = 4.3103 \times 10^3 \text{ В/с.}$$

По формулам (23) для напряжения находим постоянные интегрирования

$$tg\beta = \frac{\omega [u_L(0) - u_{Lnp}]}{\left. \frac{du_L}{dt} \right|_{t=0} + \delta [u_L(0) - u_{Lnp}]} = \frac{55.735 \cdot (0 - 0)}{4.3103 \times 10^3 + 4.310345 \cdot (0 - 0)} = 0$$

$$\beta = arctg(0) = 0^\circ$$

$$A = \frac{u_L(0) - u_{Lnp}}{\sin\beta} = \frac{0 - 0}{\sin(0^\circ)} = \left(\frac{0}{0} \right) - \text{неопределенность.}$$

Постоянную интегрирования A найдем из второго уравнения (22) для напряжения при $\beta = 0$

$$A = \frac{\left. \frac{du}{dt} \right|_{t=0}}{\omega} = \frac{4.3103 \times 10^3}{55.735} = 77.336 \text{ В.}$$

Получим

$$u_L(t) = 77.336 \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega \cdot t) + 0, \text{ В.}$$

Задаемся моментами времени, разбив отрезок времени *колебательного* переходного процесса

$$T_{II} = \frac{4}{\delta} = \frac{4}{4.31} = 0.9281 \text{ с}$$

на $N = 30$ отрезков. Результаты расчетов сведем в Таблицы 1 – 3.

Таблица 1 – Расчет тока i_C

N_{∂}	$t, \text{ с}$	$A \cdot e^{-\delta t},$ A	$\omega t + \beta,$ рад	$\sin(\omega \cdot t + \beta)$	$i_{ce}(t) =$ $A \cdot e^{-\delta t} \sin(\omega \cdot t + \beta),$ A	$i_{np}(t),$ A	$i(t) =$ $i_{ce}(t) + i_{np}(t),$ A
1	0,0000	1,729	-1,4936	-0,9970	-1,724	0	-1,724
2	0,0309	1,513	0,2305	0,2284	0,346	0	0,346
3	0,0619	1,325	1,9545	0,9273	1,228	0	1,228
4	0,0928	1,159	3,6786	-0,5116	-0,593	0	-0,593
5	0,1237	1,014	5,4027	-0,7710	-0,782	0	-0,782
6	0,1547	0,888	7,1268	0,7470	0,663	0	0,663
7	0,1856	0,777	8,8509	0,5429	0,422	0	0,422
8	0,2165	0,680	10,5749	-0,9128	-0,621	0	-0,621
9	0,2475	0,595	12,2990	-0,2642	-0,157	0	-0,157
10	0,2784	0,521	14,0231	0,9935	0,517	0	0,517
11	0,3093	0,456	15,7472	-0,0392	-0,018	0	-0,018
12	0,3403	0,399	17,4712	-0,9815	-0,392	0	-0,392
13	0,3712	0,349	19,1953	0,3389	0,118	0	0,118
14	0,4021	0,306	20,9194	0,8780	0,268	0	0,268
15	0,4331	0,267	22,6435	-0,6070	-0,162	0	-0,162
16	0,4640	0,234	24,3676	-0,6927	-0,162	0	-0,162
17	0,4949	0,205	26,0916	0,8186	0,168	0	0,168
18	0,5259	0,179	27,8157	0,4427	0,079	0	0,079
19	0,5568	0,157	29,5398	-0,9537	-0,150	0	-0,150
20	0,5877	0,137	31,2639	-0,1515	-0,021	0	-0,021
21	0,6187	0,120	32,9879	1,0000	0,120	0	0,120
22	0,6496	0,105	34,7120	-0,1539	-0,016	0	-0,016
23	0,6805	0,092	36,4361	-0,9530	-0,088	0	-0,088
24	0,7115	0,081	38,1602	0,4449	0,036	0	0,036
25	0,7424	0,070	39,8843	0,8172	0,058	0	0,058
26	0,7733	0,062	41,6083	-0,6944	-0,043	0	-0,043
27	0,8043	0,054	43,3324	-0,6051	-0,033	0	-0,033
28	0,8352	0,047	45,0565	0,8792	0,042	0	0,042
29	0,8661	0,041	46,7806	0,3366	0,014	0	0,014
30	0,8971	0,036	48,5046	-0,9820	-0,036	0	-0,036
31	0,9280	0,032	50,2287	-0,0368	-0,001	0	-0,001

Таблица 2 – Расчет напряжения u_C

$N\varrho$	$t,$ с	$A \cdot e^{-\delta t},$ B	$\omega t + \beta,$ рад	$\sin(\omega \cdot t + \beta)$	$u_{ce}(t) =$ $A \cdot e^{-\delta t} \sin(\omega \cdot t + \beta),$ B	$u_{np}(t),$ B	$u(t) =$ $u_{ce}(t) + u_{np}(t),$ B
1	0,0000	-77,34	0,0000	0,0000	0,00	500,00	500,0
2	0,0309	-67,68	1,7241	0,9883	-66,89	500,00	433,1
3	0,0619	-59,23	3,4482	-0,3018	17,88	500,00	517,9
4	0,0928	-51,84	5,1722	-0,8961	46,45	500,00	546,5
5	0,1237	-45,37	6,8963	0,5754	-26,11	500,00	473,9
6	0,1547	-39,71	8,6204	0,7204	-28,60	500,00	471,4
7	0,1856	-34,75	10,3445	-0,7954	27,64	500,00	527,6
8	0,2165	-30,41	12,0685	-0,4775	14,52	500,00	514,5
9	0,2475	-26,62	13,7926	0,9412	-25,05	500,00	474,9
10	0,2784	-23,29	15,5167	0,1901	-4,43	500,00	495,6
11	0,3093	-20,39	17,2408	-0,9993	20,37	500,00	520,4
12	0,3403	-17,84	18,9649	0,1150	-2,05	500,00	497,9
13	0,3712	-15,61	20,6889	0,9641	-15,05	500,00	484,9
14	0,4021	-13,66	22,4130	-0,4095	5,60	500,00	505,6
15	0,4331	-11,96	24,1371	-0,8391	10,04	500,00	510,0
16	0,4640	-10,47	25,8612	0,6657	-6,97	500,00	493,0
17	0,4949	-9,16	27,5852	0,6358	-5,82	500,00	494,2
18	0,5259	-8,02	29,3093	-0,8599	6,89	500,00	506,9
19	0,5568	-7,02	31,0334	-0,3733	2,62	500,00	502,6
20	0,5877	-6,14	32,7575	0,9738	-5,98	500,00	494,0
21	0,6187	-5,37	34,4816	0,0759	-0,41	500,00	499,6
22	0,6496	-4,70	36,2056	-0,9970	4,69	500,00	504,7
23	0,6805	-4,12	37,9297	0,2286	-0,94	500,00	499,1
24	0,7115	-3,60	39,6538	0,9272	-3,34	500,00	496,7
25	0,7424	-3,15	41,3779	-0,5117	1,61	500,00	501,6
26	0,7733	-2,76	43,1019	-0,7710	2,13	500,00	502,1
27	0,8043	-2,41	44,8260	0,7471	-1,80	500,00	498,2
28	0,8352	-2,11	46,5501	0,5428	-1,15	500,00	498,9
29	0,8661	-1,85	48,2742	-0,9129	1,69	500,00	501,7
30	0,8971	-1,62	49,9983	-0,2641	0,43	500,00	500,4
31	0,9280	-1,42	51,7223	0,9935	-1,41	500,00	498,6

Таблица 3 – Расчет тока i_L

$N\varrho$	$t,$ с	$A \cdot e^{-\delta t},$ A	$\omega t + \beta,$ рад	$\sin(\omega \cdot t + \beta)$	$i_{ce}(t) =$ $A \cdot e^{-\delta t} \sin(\omega \cdot t + \beta),$ A	$i_{np}(t),$ A	$i(t) =$ $i_{ce}(t) + i_{np}(t),$ A
1	0,0000	-1,729	1,4936	0,9970	-1,724	1,724	0,000
2	0,0309	-1,513	3,2177	-0,0760	0,115	1,724	1,839
3	0,0619	-1,325	4,9418	-0,9738	1,290	1,724	3,014
4	0,0928	-1,159	6,6658	0,3734	-0,433	1,724	1,291
5	0,1237	-1,014	8,3899	0,8598	-0,872	1,724	0,852
6	0,1547	-0,888	10,1140	-0,6359	0,565	1,724	2,289
7	0,1856	-0,777	11,8381	-0,6656	0,517	1,724	2,241
8	0,2165	-0,680	13,5622	0,8392	-0,571	1,724	1,153
9	0,2475	-0,595	15,2862	0,4093	-0,244	1,724	1,481
10	0,2784	-0,521	17,0103	-0,9642	0,502	1,724	2,226
11	0,3093	-0,456	18,7344	-0,1149	0,052	1,724	1,777
12	0,3403	-0,399	20,4585	0,9993	-0,399	1,724	1,325
13	0,3712	-0,349	22,1825	-0,1902	0,066	1,724	1,791
14	0,4021	-0,306	23,9066	-0,9412	0,288	1,724	2,012
15	0,4331	-0,267	25,6307	0,4776	-0,128	1,724	1,596
16	0,4640	-0,234	27,3548	0,7953	-0,186	1,724	1,538
17	0,4949	-0,205	29,0789	-0,7205	0,148	1,724	1,872
18	0,5259	-0,179	30,8029	-0,5753	0,103	1,724	1,827
19	0,5568	-0,157	32,5270	0,8962	-0,141	1,724	1,584
20	0,5877	-0,137	34,2511	0,3017	-0,041	1,724	1,683
21	0,6187	-0,120	35,9752	-0,9883	0,119	1,724	1,843
22	0,6496	-0,105	37,6992	0,0001	0,000	1,724	1,724
23	0,6805	-0,092	39,4233	0,9883	-0,091	1,724	1,633
24	0,7115	-0,081	41,1474	-0,3019	0,024	1,724	1,748
25	0,7424	-0,070	42,8715	-0,8961	0,063	1,724	1,787
26	0,7733	-0,062	44,5956	0,5755	-0,036	1,724	1,689
27	0,8043	-0,054	46,3196	0,7203	-0,039	1,724	1,685
28	0,8352	-0,047	48,0437	-0,7955	0,038	1,724	1,762
29	0,8661	-0,041	49,7678	-0,4774	0,020	1,724	1,744
30	0,8971	-0,036	51,4919	0,9413	-0,034	1,724	1,690
31	0,9280	-0,0317	53,2159	0,1900	-0,0060	1,724138	1,718

По результатам расчетов в Таблицах 1 – 3 строим графики переходных процессов (рис. 4, 5).

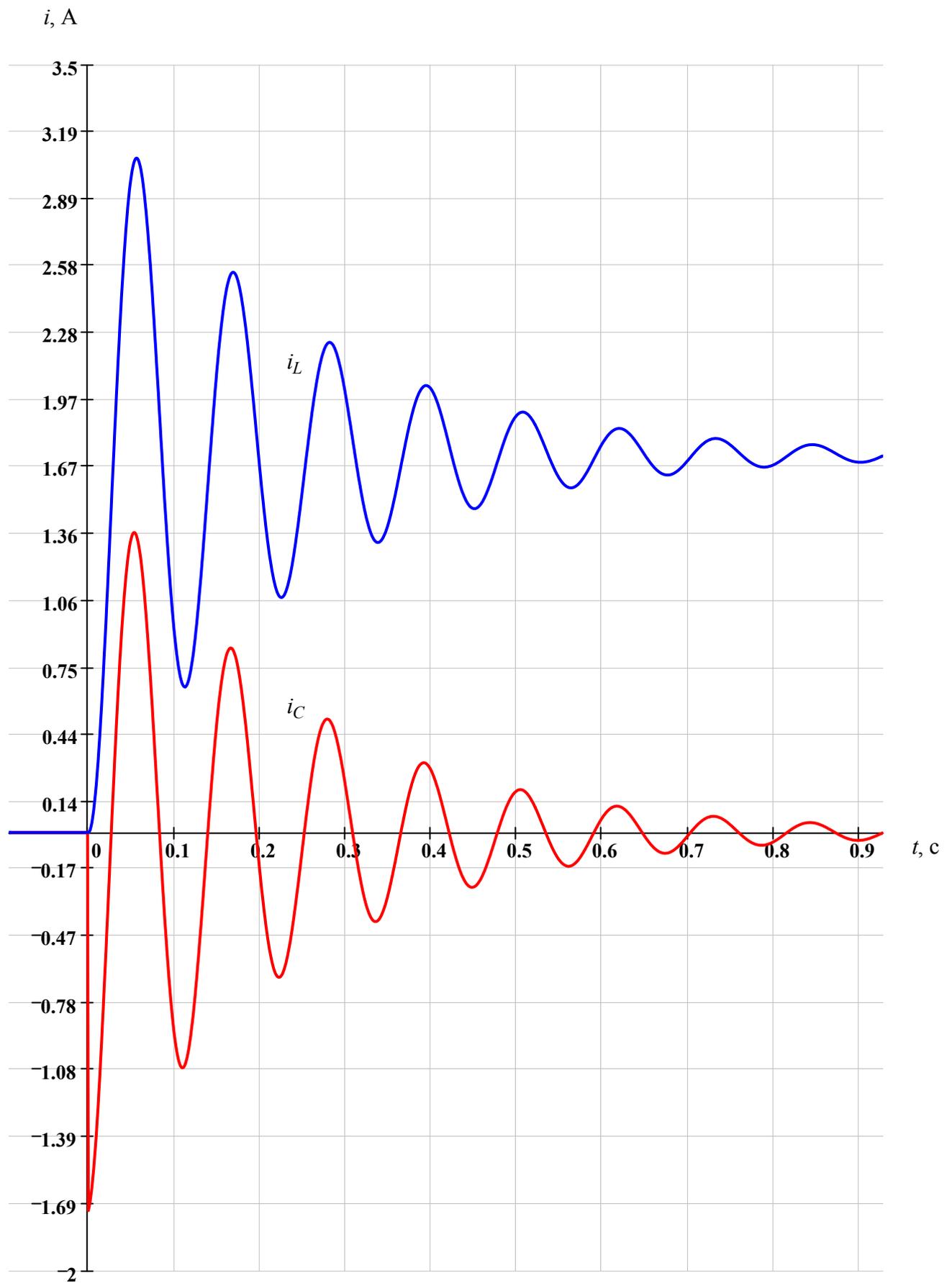


Рис. 4

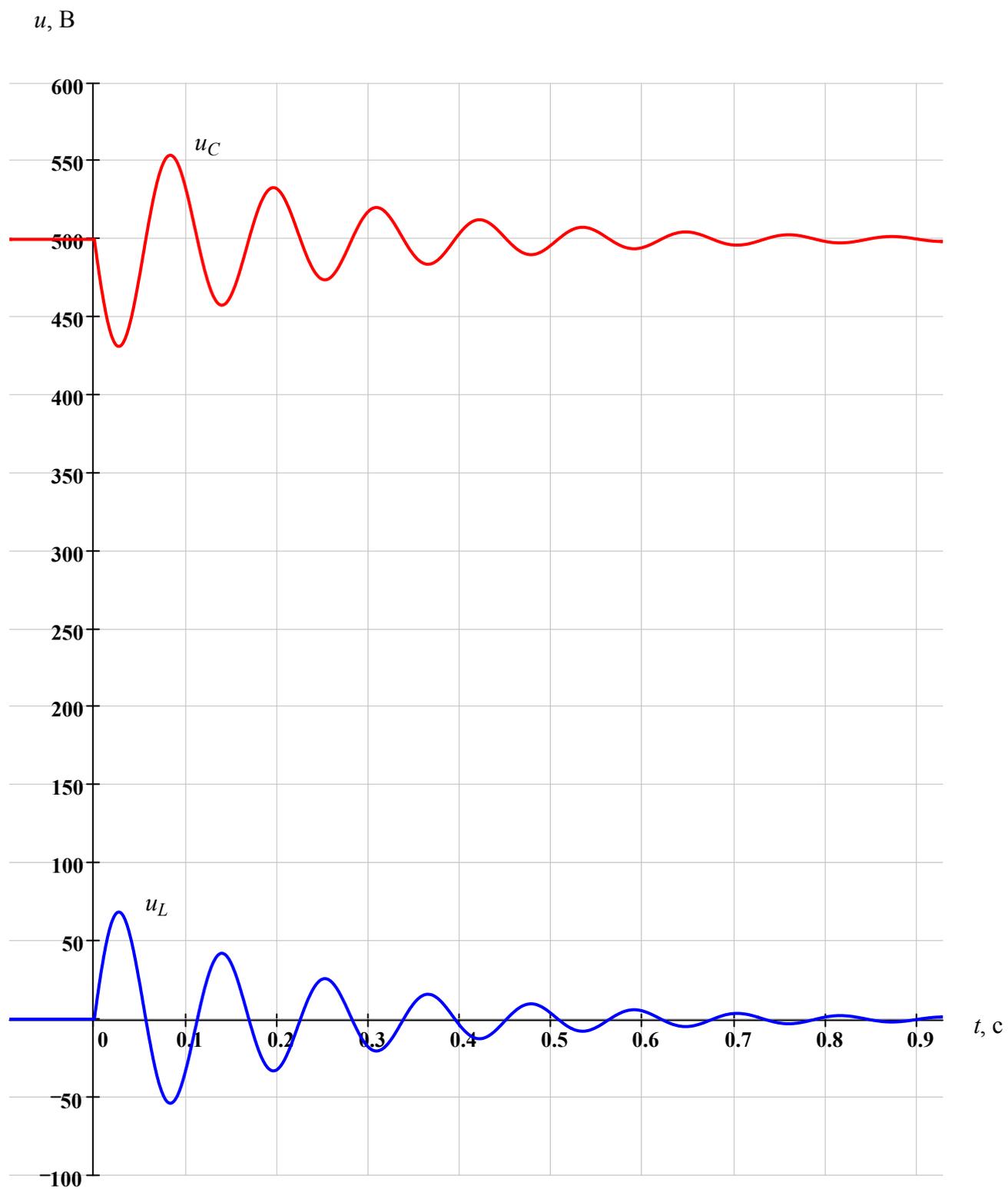


Рис. 5

2 Расчет переходного процесса операторным методом

Составим операторную схему замещения цепи (рис. 6).

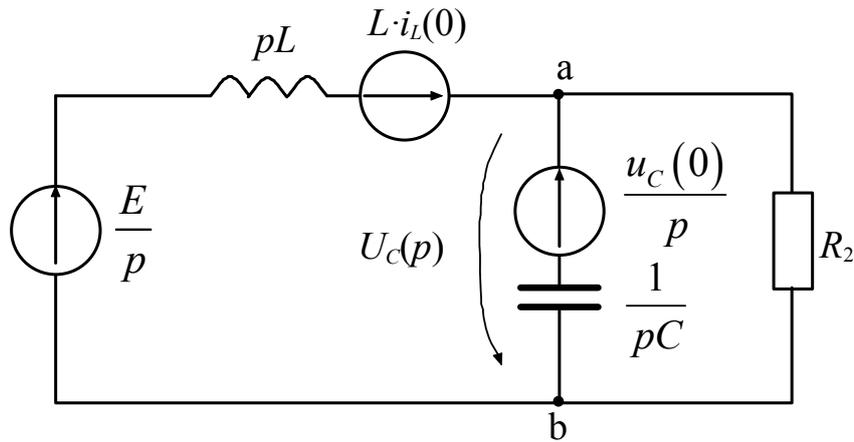


Рис. 6

Для схемы (рис. 8) запишем выражение для узлового напряжения в операторной форме:

$$U_{ab}(p) = \frac{\frac{E/p + Li_L(0)}{Lp} + \frac{u_c(0)/p}{1/(Cp)}}{\frac{1}{Lp} + \frac{1}{1/(Cp)} + \frac{1}{R_2}}$$

После преобразований получим

$$U_C(p) = U_{ab}(p) = \frac{u_c(0) \cdot p^2 + \frac{i_L(0)}{C} \cdot p + \frac{E}{LC}}{p \cdot \left(p^2 + \frac{1}{R_2 C} \cdot p + \frac{1}{LC} \right)}$$

Находим операторное выражение для напряжения на конденсаторе $u_C(t)$

$$U_C(p) = \frac{F_1(p)}{p \cdot F_2(p)} = \frac{500 \cdot p^2 + 1562500}{p \cdot \left(p^2 + \frac{250}{29} \cdot p + 3125 \right)}, \quad (24)$$

где

$$F_1(p) = 500 \cdot p^2 + 1562500$$

$$F_2(p) = p^2 + \frac{250}{29} \cdot p + 3125$$

Оригинал напряжения на конденсаторе находим по формуле разложения

$$U_C(p) = \frac{F_1(p)}{p \cdot F_2(p)} \stackrel{\bullet}{=} u_C(t) = \frac{F_1(0)}{F_2(0)} + \sum_{k=1}^2 \frac{F_1(p_k)}{p_k \cdot F_2'(p_k)} e^{p_k t},$$

где p_k корни уравнения

$$F_2(p) = 0. \quad (25)$$

Решение уравнения (25)

$$p^2 + \frac{250}{29} \cdot p + 3125 = 0$$

дает корни

$$p_1 = -4.31 + 55.735j \text{ 1/c}; \quad p_2 = -4.31 - 55.735j \text{ 1/c}$$

Также

$$F_2'(p) = 2 \cdot p + \frac{250}{29};$$

$$\frac{F_1(0)}{F_2'(0)} = \frac{1.5625 \times 10^6}{3.125 \times 10^3} = 500;$$

$$\frac{F_1(p_1)}{p_1 \cdot F_2'(p_1)} = \frac{18579 - 240238j}{(-4.31 + 55.735j) \cdot 111.471j} = -0.000 + 38.668j;$$

$$\frac{F_1(p_2)}{p_2 \cdot F_2'(p_2)} = \frac{18579 + 240238j}{(-4.31 - 55.735j) \cdot (-111.471j)} = -0.000 - 38.668j.$$

Откуда

$$\begin{aligned}u_C(t) &= \frac{F_1(0)}{F_2(0)} + \frac{F_1(p_1)}{F_2'(p_1)} e^{p_1 t} + \frac{F_1(p_2)}{F_2'(p_2)} e^{p_2 t} = \\&= 500 + (38.668j) \cdot e^{(-4.31+55.735j) \cdot t} + (-38.668j) \cdot e^{(-4.31-55.735j) \cdot t} = \\&= 500 + \\&+ e^{-4.31 \cdot t} [(38.668j) \cdot (\cos(55.735 \cdot t) + j \cdot \sin(55.735 \cdot t)) + \\&+ (-38.668j) \cdot (\cos(55.735 \cdot t) - j \cdot \sin(55.735 \cdot t))] = \\&= 500 + e^{-4.31 \cdot t} \cdot (-2 \cdot 38.668 \cdot \sin(55.735 \cdot t) + 0 \cdot \cos(55.735 \cdot t)) = \\&= 500 + e^{-4.31 \cdot t} \cdot (-77.34) \cdot \sin(55.735 \cdot t) = \\&= 500 - 77.34 \cdot e^{-4.31 \cdot t} \cdot \sin(55.735 \cdot t + 0^\circ), \text{ В.}\end{aligned}$$

Закон изменения напряжения на конденсаторе и катушке индуктивности во времени:

$$u_C(t) = -77.34 \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega \cdot t + 0^\circ) + 500, \text{ В.}$$

Закон изменения напряжения на конденсаторе во времени, полученный операторным методом, совпадает с законом изменения напряжения на конденсаторе во времени, который получен классическим методом .