

Томский государственный университет систем
управления и радиоэлектроники

Факультет вычислительных систем (ФВС)
Кафедра Моделирования и системного анализа (МиСА)

Т.В. Ганджа, В.Е. Коваленко

Электротехника и электроника

Методические указания по самостоятельной работе для
студентов ТУСУР по дисциплинам «Теоретические основы
электротехники», «Анализ динамических систем», «Теория
цепей и сигналов»

Томск – 2015

Т.В. Ганджа Т.В., В.Е. Коваленко

Электротехника и электроника. / Методические указания для самостоятельной работы студентов ТУСУР. Кафедра Моделирования и системного анализа, Факультет вычислительных систем. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. – Томск: 2015. – 28 с.

Методические указания подготовлены на кафедре моделирования и системного анализа ТУСУРа и предназначены для студентов электротехнических и информационных направлений и специальностей очной и дистанционной форм обучения для выполнения самостоятельной работы по дисциплинам «Теоретические основы электротехники и электроника», «Анализ динамических систем» и «Теория цепей и сигналов»

© Т.В. Ганджа Т.В., В.Е. Коваленко

© Факультет вычислительных систем, кафедра моделирования и системного анализа, 2015

СОДЕРЖАНИЕ

1 Введение	4
2. Курсовая работа	5
2.1. Задание на курсовую работу	5
2.2. Расчёт переходного процесса классическим методом при постоянном воздействии $\epsilon(t)=E_0$	6
2.3. Расчёт переходного процесса операторным методом при $e(t) = E_0$	6
2.4. Расчет переходного процесса классическим методом в любой ветви при $e(t) = E_0 \sin(\omega t + \varphi)$	7
2.5 Графики переходного процесса.	8
3. Указания к выполнению курсового проекта	9
3.1 Формат технического задания и варианты заданий	9
3.2 Пример выполнения курсовой работы	14
3.2.1 Классический метод.....	14
3.2.2 Операторный метод.	18
3.2.3 Расчет переходного процесса при синусоидальном воздействии	20
3.3. Расчет переходного процесса при несинусоидальном воздействии	24
3.4. Исследование влияния параметра конденсатора C_3 на характер переходного процесса.....	24
3.5. График переходного процесса.	25

1 Введение

Курсовая работа по расчёту переходных процессов в линейных электрических цепях при несинусоидальных воздействиях базируется на знании студентами следующих разделов электротехники:

- 1) расчёт линейных цепей постоянного тока;
- 2) расчёт линейных цепей синусоидального и несинусоидального токов;
- 3) классический и операторный методы расчёта переходных процессов.

Успешному выполнению курсовой работы способствуют знания таких разделов «Высшей математики», как:

- 1) решение системы линейных алгебраических уравнений, матрицы;
- 2) элементы теории комплексных чисел и переменных;
- 3) дифференциальные уравнения, решение системы дифференциальных уравнений;
- 4) операционное исчисление, преобразование Лапласа.

Курсовая работа имеет основные цели и задачи:

- 1) закрепить полученные теоретические знания по расчёту установившихся и переходных процессов в линейных электрических цепях при различной форме входного воздействия;
- 2) развивать навыки совместного использования знаний различных дисциплин (ТОЭ, математика, информатика) при решении конкретного вопроса;
- 3) получение навыков использования компьютерных технологий в различных областях исследовательских и расчётных работ.

2. Индивидуальное задание

2.1. Задание на самостоятельную работу

Вариант задания на самостоятельную работу состоит из трёх цифр:

- первая цифра соответствует номеру строки табл. 3.1 задания;
- вторая цифра соответствует номеру строки табл. 3.2 задания;
- третья цифра – номер расчётной схемы рис. 3.1-3.9.

В работе требуется выполнить расчёт переходного процесса в линейной цепи, представленной на рис.1. На вход схемы подается напряжение:

- a) $e(t) = E_0 = const$;
- b) $e(t) = E_0 \sin(\omega t + \varphi)$;
- c) $e(t) = E_0 + E_0 \sin(\omega t + \varphi)$.

2.2 Порядок выполнения курсовой работы.

Основные этапы выполнения курсовой работы следующие:

- I. Составление реферата по теории переходных процессов:
 - a) причины возникновения переходных процессов;
 - b) применение дифференциальных уравнений при расчёте переходного процесса в ЭЦ;
 - c) классический метод расчёта;
 - d) операторный метод расчёта переходного процесса;
 - e) особенности расчёта переходного процесса при \sin -воздействии.

2.2. Расчёт переходного процесса классическим методом при постоянном воздействии $e(t)=E_0$

Классическим методом необходимо найти аналитическую зависимость для всех токов предлагаемой схемы, а также $U_L(t)$ и $U_C(t)$. При этом удобнее придерживаться следующего порядка:

а) Определение граничных условий. Заполнение таблицы ГУ.

б) Определение корней характеристического уравнения. Желательно записать систему дифференциальных уравнений, преобразовать её через ток на индуктивности или напряжения на ёмкости. С учётом полученного выражения записать характеристическое уравнение и найти его корни P_k .

Для проверки правильности найденных корней воспользоваться методом входного сопротивления:

$$Z(p) = 0 \Rightarrow P_k - \text{корни } Z(p).$$

с) С учётом ГУ и корней характеристического уравнения найти постоянные интегрирования и записать: $i_C(t)$, $U_C(t)$; $i_L(t)$, $U_L(t)$;

Ток в ветви, не содержащей L или C , определить из закона Кирхгофа.

2.3. Расчёт переходного процесса операторным методом

при $e(t) = E_0$.

Операторным методом необходимо определить зависимости для двух величин: $i_L(t)$ и $U_L(t)$ или $U_C(t)$ и $i_C(t)$.

Для расчета схемы операторным методом требуется:

1. Составить операторную схему замещения с учётом независимых начальных условий ($i_L(0)$, $U_C(0)$) после коммутации;

2. Найти изображение искомой величины $[I_L(p), U_L(p), I_C(p), U_C(p)]$ с учётом схемы замещения любым методом (МКТ, МУП, законы Кирхгофа);

3. найти оригиналы искомым величин, например, используя теорему разложения. Сравнить полученный результат с классическим методом.

2.4. Расчет переходного процесса классическим методом в любой ветви при $e(t) = E_0 \sin(\omega t + \varphi)$

При расчёте переходного процесса от воздействия синусоидальной ЭДС особое внимание следует обратить на определение граничных условий. Для моментов времени $t(0_-)$ и $t(\infty)$ значения токов и напряжений определяются методом комплексных амплитуд. В момент времени $t(0)$ записывается и решается система уравнений по методу законов Кирхгофа относительно величин $[i(0), U_L(0), U_C(0), e(0)]$.

Для нахождения постоянных интегрирования записывается общее выражение для $U_C(t)$ или $i_L(t)$ с учётом корней характеристического уравнения. Корни P_k не зависят от вида воздействия и берутся из выполненных ранее расчётов.

Записывается выражение переходных величин:

$i_L(t)$ и $U_L(t)$ или $U_C(t)$ и $i_C(t)$ при $e(t) = E_0 + E_0 \sin(\omega t + \varphi)$.

Исследуется влияние изменения параметра какого-либо элемента (по указанию преподавателя) на характер переходного процесса. Характер переходного процесса зависит от корней характеристического уравнения.

Если

$P_1 \neq P_2 < 0$, то процесс аperiodический;

$P_1 \neq P_2 = -\beta = j\omega_{cs}$ (комплексно сопряжённые), процесс колебательный;

$P_1 = P_2 < 0$, режим критический.

В курсовой работе рассматривается цепь второго порядка, следовательно, характеристическое уравнение – квадратное. Данный вопрос решается исследованием дискриминанта. Если дискриминант равен нулю, то $P_1 \neq P_2 < 0$, режим критический. Далее определяются области значений параметров указанного элемента, соответствующие колебательному и апериодическому режимам.

2.5 Графики переходного процесса.

В курсовой работе необходимо привести графики тока в любой ветви или напряжения на элементе при различном воздействии: $e_1(t) = E_0$; $e_2(t) = E_0 \sin(\omega t + \alpha)$; $e_3(t) = e_1(t) + e_2(t)$.

Для построения графиков необходимо определить временной интервал $0 \leq t \leq t_{III}$ и масштабы тока $m_i = A/см$, напряжения $m_i = B/см$ по оси ординат и времени $m_i = tc/см$ по оси абсцисс. Каждый график должен занимать половину листа.

Время переходного процесса $t_{III} = 5\tau$, где τ - постоянная переходного процесса. Если $P_1 \neq P_2 < 0$, то $\tau = 1/|P_{min}|$, а при $P_1 \neq P_2 = -\delta \pm j\omega$, $\tau = 1/|\delta|$. Для построения графиков использовать программу «Макрокалькулятор, число расчетных точек сто и более.

В приложении приведен лист задания, пример расчета переходного процесса и исследования влияния параметра указанного элемента на характер переходного процесса, графики при различных воздействиях.

3. Указания к выполнению курсового проекта

3.1 Формат технического задания и варианты заданий

Федеральное агентство по образованию
Томский государственный университет систем
управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

Высший колледж информатики, электроники и
менеджмента

На курсовую работу по дисциплине «Общая электротехника и электроника»

Студент гр. _____

1. Тема работы: Расчет переходного процесса в ЭЦ второго порядка при несинусоидальной ЭДС.

2. Исходные данные к работе: $e(t) = E_0 + E_0 \sin(\omega t + \varphi)$

Вариант расчета _____

3. Содержание работы.

3.1. Исходные данные к работе;

3.2. Общие вопросы теории переходных процессов;

3.2.1. Причины возникновения переходных процессов;

3.2.2. Общее решение для тока или напряжения в ЭЦ второго порядка;

3.2.3. Общая методика расчета при несинусоидальном воздействии.

3.3. Классический метод расчета переходного процесса при $e(t) = E_0$;

3.4. Операторный метод расчета переходного процесса при $e(t) = E_0$ для $i_k(t)$, $u_k(t)$ по указанию преподавателя.

3.5. Классический метод расчета переходного процесса при $e(t) = E_0 \sin(\omega t + \varphi)$ для $i_k(t)$, $u_k(t)$ по выбору.

3.6. Исследование влияния параметра индуктивности или емкости на характер переходного процесса.

4. Записать аналитическое выражение $i_k(t)$, $U_k(t)$ при несинусоидальном воздействии и привести графики.

5. Литература.

Срок сдачи курсовой работы _____

Задание принял к исполнению _____

подпись

дата

Таблица 3.1. Таблица вариантов параметров

№ п.п	$L1$	$L2$	$L3$	$L4$	$C1$	$C2$	$C3$	$C4$
	Γ_H	Γ_H	Γ_H	Γ_H	$мкФ$	$мкФ$	$мкФ$	$МкФ$
1	0.1	0.4	0.1	0.03	20	50	15	40
2	0.15	0.45	0.15	0.025	10	60	20	25
3	0.2	0.5	0.2	0.03	15	70	25	30
4	0.25	0.6	0.25	0.05	20	40	15	45
5	0.3	0.7	0.3	0.06	15	35	20	50
6	0.15	0.8	0.4	0.02	20	25	30	60
7	0.2	0.9	0.45	0.01	30	20	25	70
8	0.25	0.8	0.5	0.02	40	45	30	40
9	0.1	0.5	0.4	0.06	50	40	30	45

Таблица 3.2. Таблица вариантов параметров

№ п.п	E_0	$R1$	$R2$	$R3$	$R4$	ω	φ
	B	$Ом$	$Ом$	$Ом$	$Ом$	$рад/с$	$Град$
1	100	10	5	20	30	100	30
2	110	20	6	10	40	150	-30
3	120	15	6.5	30	20	200	45
4	130	25	7	40	35	250	-45
5	140	20	4	50	30	300	60
6	150	30	4.5	25	25	350	-60
7	160	40	3.5	30	20	400	90
8	170	25	2	35	40	450	-90
9	180	15	4	25	50	500	0

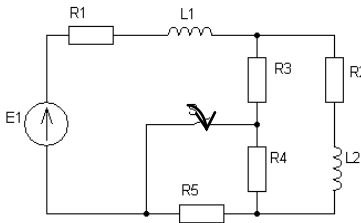


Рис. 3.1

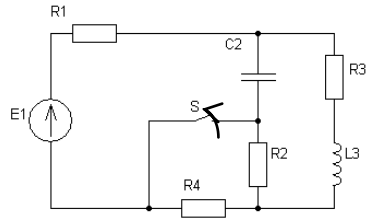


Рис. 3.2

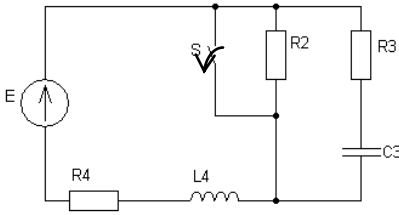


Рис. 3.3

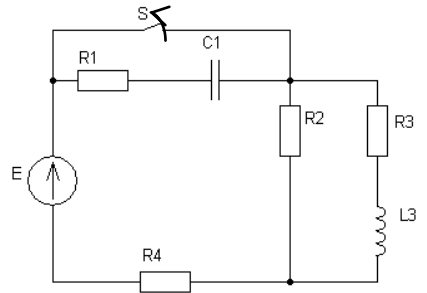


Рис. 3.4

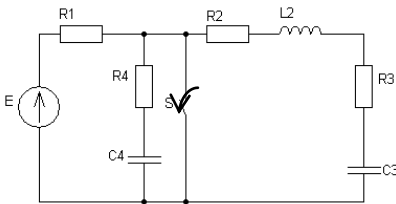


Рис. 3.5

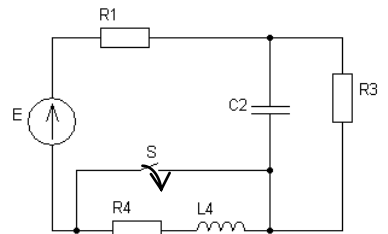


Рис. 3.6

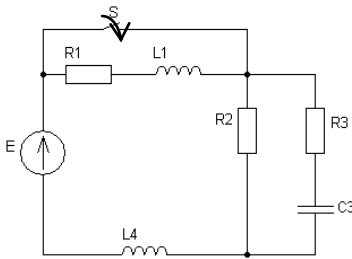


Рис. 3.7

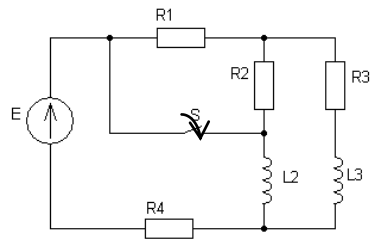


Рис. 3.8

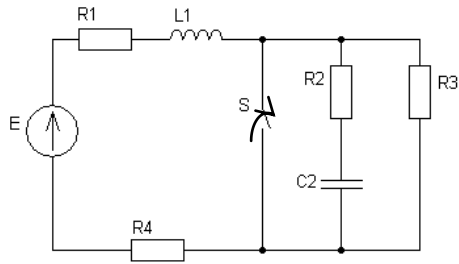


Рис. 3.9

3.2 Пример выполнения курсовой работы

Исходные данные:

Пусть для схемы (рис. 3.10) дано $E=260$ В; $L_1=0.4$ Гн; $C_3=4 \cdot 10^{-4}$ Ф; $R_1=R_2=R_3=R=52$ Ом, $\omega=100$ с⁻¹, $\varphi=30^\circ$.
Рассчитаем токи в ветвях и напряжении U_L и U_C .

3.2.1 Классический метод.

А) *Определение граничных условий (ГУ).* При $t=0$ ключ замкнут (рис. 3.11). Независимые начальные условия (ННУ):

$$U_c(0_-) = E = 260 \text{ В};$$

$$i_1(0_-) = \frac{E}{R_2 + \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}} = 3.33 \text{ (А)}.$$

При $t=0$ ключ разомкнут (рис. 3.12). Для определения зависимых начальных условий (ЗНУ) запишем систему уравнений по Кирхгофу и решим ее с учетом ННУ:

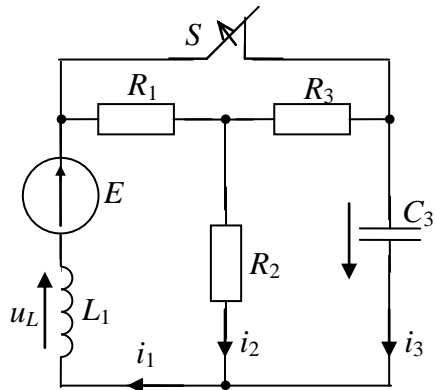


Рис. 3.10

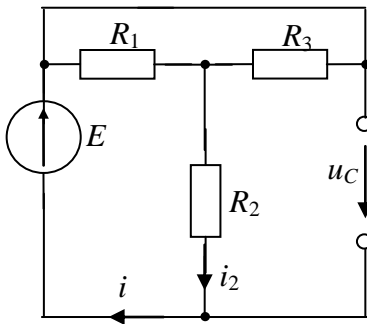


Рис. 3.11

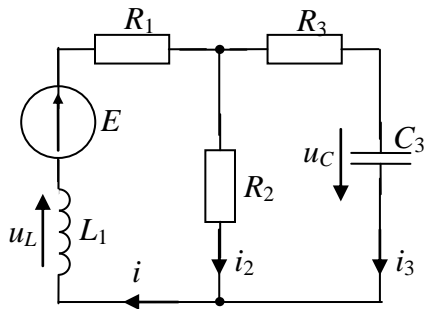


Рис. 3.12

$$\left. \begin{aligned} i_1 - i_2 - i_3 &= 0; \\ i_1 R_1 + i_2 R_2 + u_L &= E; \\ i_3 R_3 + u_C - i_2 R_2 &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} 3.33 - i_2 - i_3 &= 0; \\ 173.33 + 52R_2 + u_L &= 260; \\ 52R_3 + 260 - 52R_2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Отсюда $i_2 = 4.167 \text{ A}$, $i_3 = -0.833$, $u_L = -130 \text{ В}$.

При $t \rightarrow \infty$ ключ замкнут (рис. 3.13).

Конечные условия (КУ):

$$u_L = 0; \quad i_3 = 0;$$

$$i_1 = i_2 = \frac{E}{R_1 + R_2} = 2.5 \text{ A};$$

$$u_C = i_2 R_2 = 130 \text{ В}.$$

Составим таблицу ГУ
(табл. 3.3).

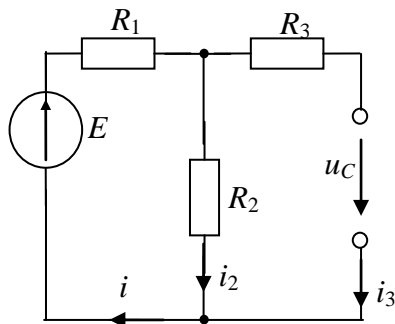


Рис. 3.13

Таблица 3.3

Время	i_1, A	i_2, A	i_3, A	$u_C, \text{В}$	$u_L, \text{В}$
$t = 0_-$	3.33	—	—	260	—
$t = 0$	3.33	4.167	-0.833	260	-130
$t \rightarrow \infty$	2.5	2.5	0	130	0

В) *Определение корней характеристического уравнения.*
По методу входного сопротивления ($t=0$):

$$Z(p) = R_3 + \frac{1}{C_3 p} + \frac{R_2(R_1 + L_1 p)}{R_1 + R_2 + L_1 p} = 0. \quad (3)$$

Выполним преобразования и учтем, что $R_1 = R_2 = R_3 = R$.

Тогда:

$$\frac{2RL_1 C_3 p^2 + (3R^2 C_3 + L_1)p + 2R}{C_3 p(2R + L_1 p)} = 0. \quad (4)$$

С учетом параметров цепи:

$$0,01664p^2 + 3,6448p + 104 = 0. \quad (5)$$

Характеристическому уравнению (5) соответствуют корни:

$$p_1 = -33,727c^{-1}, \quad p_2 = -185,311c^{-1}. \quad (6)$$

С) *Определение постоянных интегрирования и вычисление зависимостей токов и напряжений.* Для ветви, содержащий конденсатор, решение удобнее записывать, начиная с напряжения на конденсаторе с учетом корней характеристического уравнения (6):

$$\left. \begin{aligned} u_C(t) &= u_{Cnp} + u_{Ccs} = u_C(\infty) + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}; \\ \frac{du_C}{dt} &= p_1 A_1 e^{p_1 t} + p_2 A_2 e^{p_2 t} = \frac{i_3(t)}{C_3}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Уравнения (7) выполняются для любого момента времени.
При $t=0$:

$$\left. \begin{aligned} u_C(0) &= 130 + A_1 + A_2 = 260 \\ \frac{du_C}{dt} &= p_1 A_1 + p_2 A_2 = \frac{i_3(0)}{C_3} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Из (8) получим $A_1 = 145,181$, $A_2 = -15,181$.

Тогда:

$$u_C(t) = 130 + 145,181e^{-33,727t} - 15,181e^{-185,3t} \text{ В}$$

$$i_3(t) = C_3 \frac{du_C}{dt} = -1,959e^{p_1 t} + 1,125e^{p_2 t} \text{ А}$$

Для ветви с индуктивностью решение записывают, начиная с тока ветви:

$$\left. \begin{aligned} i_1(t) &= i_{1np} + i_{1св} = i_1(\infty) + B_1 e^{p_1 t} + B_2 e^{p_2 t}; \\ \frac{di_1}{dt} &= p_1 B_1 e^{p_1 t} + p_2 B_2 e^{p_2 t} = \frac{u_L(t)}{L_1}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

При $t=0$ с учетом ГУ:

$$\left. \begin{aligned} i_1(0) &= 2,5 + B_1 + B_2 = 3,33; \\ \frac{di_1(0)}{dt} &= -33,727B_1 - 185,311B_2 = \frac{-130}{0,4} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Из (10) получим $B_1 = -1,126$, $B_2 = 1,958$.

Тогда:

$$i_1(t) = 2,5 - 1,126e^{-33,727t} + 1,958e^{-185,311t} \text{ А}$$

$$u_L(t) = L_1 \frac{di_1}{dt} = 15,2e^{p_1 t} - 145,2e^{p_2 t} \text{ В}$$

$$\left. \begin{aligned} i_1(t) &= 2,5 - 1,126e^{-33,727t} + 1,958e^{-185,311t}, \text{ А;} \\ u_L(t) &= L_1 \frac{di_1}{dt} = 15,2e^{p_1 t} - 145,2e^{p_2 t}, \text{ В.} \end{aligned} \right\}$$

По первому закону Кирхгофа

$$i_2(t) = i_1(t) - i_3(t) = 2,5 + 0,833e^{p_1 t} + 0,833e^{p_2 t}, \text{ А.}$$

3.2.2 Операторный метод

А) Составление операторной схемы замещения (ОСЗ). ОСЗ составляется для послекоммутиационного режима ($t=0$) с учетом ННУ. В ветвь с индуктивностью включается фиктивный источник ЭДС $e_L(p) = Li_L(0)$, направленный по току в ветви с индуктивностью включается фиктивный источник ЭДС $e_{nc}(p) = \frac{u_c(0)}{p}$, направленный против тока в ветви с конденсатором (см. рис. 3.14)

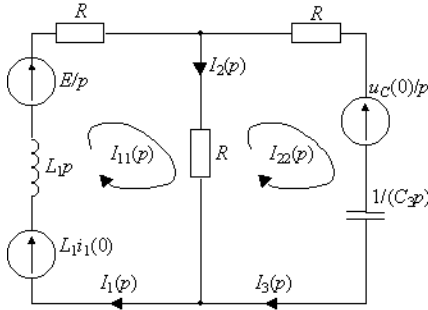


Рис. 3.14

В) *Определение изображения токов.* Найдем изображения токов, например, методом контурных токов, решив систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} I_{11}(p)(2R + L_1p) - I_{22}(p)R &= \frac{E + i_1(0)L_1p}{p}; \\ -I_{11}(p)R + I_{22}(p)\left(2R + \frac{1}{C_3p}\right) &= -\frac{u_c(0)}{p}, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

с учетом ННУ и параметров схемы, методом Крамера

$$\Delta = \begin{vmatrix} 104 + 0,4p & -52 \\ -52 & \frac{0,0416p + 1}{0,0004p} \end{vmatrix} = \frac{0,01664p^2 + 3,6448p + 104}{0,0004p};$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} \frac{260+1,332p}{p} & -52 \\ -\frac{260}{p} & \frac{0,0416p+1}{0,0004p} \end{vmatrix} = \frac{0,05541p^2 + 6,74p + 260}{0,0004p^2};$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 104+0,4p & \frac{260+1,332p}{p} \\ -52 & \frac{-260}{p} \end{vmatrix} = \frac{-34,74p - 13520}{p};$$

$$\left. \begin{aligned} I_{11}(p) &= \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{0,05541p^2 + 6,74p + 260}{p(0,01664p^2 + 3,6448p + 104)} = \frac{A(p)}{pB(p)}; \\ I_{22}(p) &= \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{-0,013896p - 5,408}{0,01664p^2 + 3,6448p + 104} = \frac{D(p)}{B(p)} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

С). Вычисление оригиналов токов в ветвях. По методу контурных токов $I_1(p) = I_{11}(p)$; $I_3(p) = I_{22}(p)$.

Используя теорему разложения, запишем:

$$i_1(t) = \frac{A(0)}{B(0)} + \frac{A(p_1)}{p_1 B'(p_1)} e^{p_1 t} + \frac{A(p_2)}{p_2 B'(p_2)} e^{p_2 t}, \quad (13)$$

где p_1 и p_2 - корни полинома $B(p)$.

Вычислим коэффициенты, входящие в (1.13):

$$\begin{aligned} A(0) &= 260; & B(0) &= 104; & A(p_1) &= 95,709; & A(p_2) &= 913,79; \\ B'(p) &= 0,03328p + 3,6448; & & & B'(p_1) &= 2,5224; & & \\ B'(p_2) &= -2,5224. \end{aligned}$$

После подстановки значений коэффициентов в (1.13) получим оригинал тока

$$i_1(t) = 2,5 - 1,125e^{-33,727t} + 1,955e^{-185,311t} \text{ А} \quad (14)$$

Аналогично находим оригинал $i_3(t)$:

$$i_3(t) = \frac{D(p_1)}{p_1 B'(p_1)} e^{p_1 t} + \frac{D(p_2)}{p_2 B'(p_2)} e^{p_2 t}; \quad (15)$$

$$D(p_1) = -4,939; \quad D(p_2) = -2,833;$$

$$i_3(t) = -1,958e^{-33,727t} + 1,123e^{-185,311t}, \text{ А.} \quad (16)$$

По первому закону Кирхгофа

$$i_2(t) = i_1(t) - i_3(t) = 2,5 + 0,833e^{-33,727t} + 0,833e^{-185,311t} \quad (17)$$

Значение токов в ветвях, вычисленные классическим и операторным методами, совпали.

Напряжения $u_C(t)$ и $u_L(t)$ можно вычислить путем отыскания из изображений, а затем – оригиналов (или по второму закону Кирхгофа):

$$u_C(p) = \frac{I_3(p)}{C_3 p} + \frac{u_C(0)}{p} = \frac{D(p)}{C_3 p B(p)} + \frac{260}{p}; \quad (18)$$

$$u_C(p) = \frac{4,3264p^2 + 912,91p + 13520}{p(0,01664p^2 + 3,6448p + 104)} = \frac{N(p)}{pB(p)};$$

$$u_C(t) = \frac{N(0)}{B(0)} + \frac{N(p_1)}{p_1 B'(p_1)} e^{p_1 t} + \frac{N(p_2)}{p_2 B'(p_2)} e^{p_2 t}; \quad (19)$$

По второму закону Кирхгофа

$$i_1 R + i_2 R + u_L = E.$$

Отсюда

$$u_L = E - R(i_1 + i_2) = 260 - 52(5 - 0,292e^{p_1 t} + 2,79e^{p_2 t}).$$

Тогда

$$u_L(t) = 15,18e^{-33,727t} - 145,08e^{-185,311t}, \text{ В.} \quad (20)$$

Можно найти изображение, $u_1(p) = I_1(p)L_1 p - L_1 i_1(0)$, а затем перейти к оригиналу.

3.2.3 Расчет переходного процесса при синусоидальном воздействии

Расчет выполним классическим методом при $e(t) = 260 \sin(100t + 30^\circ)$ В.

Схема и параметры цепи соответствуют исходным данным:

$$L_1 = 0,4 \text{ Гн};$$

$$C_3 = 4 \cdot 10^{-4} \text{ Ф}; \text{ Ом.}$$

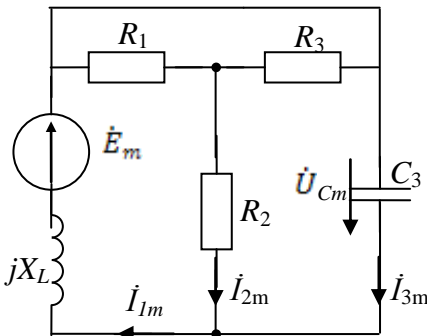


Рис. 3.15

Определение граничных условий

При $t(0_-)$ ключ замкнут, составим комплексную схему замещения рис. 3.15.

Определим комплекс тока через индуктивность \dot{I}_{lm} и комплекс напряжения на емкости \dot{U}_{cm}

$$X_L = \omega L = 40 \text{ Ом}; \quad X_C = \frac{1}{\omega C} = 25 \text{ Ом}.$$

$$\dot{I}_{lm} = \frac{\bar{E}_m}{\underline{Z}_{bx}}; \quad \underline{Z}_{ax} = jx_L + \underline{Z}' = 7,27 + j17,33 = 18,79e^{j67,25} \text{ Ом}$$

$$\underline{Z}' = \frac{R'(-jxc)}{R' - jxc} = \frac{78 \cdot (-j25)}{78 - j25} = 7,25 - j27,67 \text{ Ом}$$

$$R' = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3} + R_2 = 78 \text{ Ом}.$$

$$\bar{I}_{lm} = \frac{260e^{j30}}{18,79e^{j67,25}} = 13,84e^{-j37,25} \neq A.$$

Напряжение \dot{U}_{cm} определим из второго закона Кирхгофа для внешнего контура.

$$\bar{E}_m = \dot{U}_{cm} + \dot{I}_{cm}(jx_L) \Rightarrow \dot{U}_{cm} = \bar{E}_m - \dot{I}_m(jx_L);$$

$$\dot{U}_{cm} = 260e^{j30} - 13,84e^{-j37,25} \cdot (j40) = -109,85 - j310,55 = 329,41e^{-j109,48} B.$$

По найденным комплексам запишем

$$i_2(t) = i_1(t) = 13,84 \sin(100t - 37,75^\circ) A.$$

$$U_c(t) = 329,41 \sin(100t - 109,48^\circ) B.$$

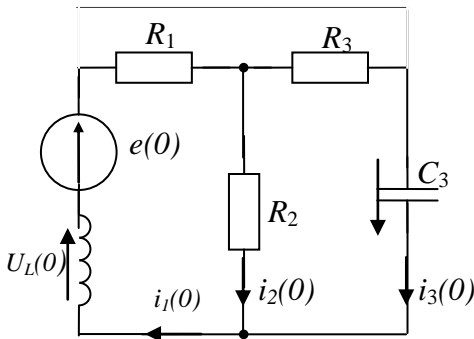


Рис. 3.16

Вычислим значения

этих величин при $t(0)$:

$$i_1(0) = 13,84 \cdot \sin(-37,25^\circ) = -8,375 A;$$

$$U_c(0) = 329,41 \sin(-109,48^\circ) = -310,5 B.$$

$t(0)$ ключ разомкнут расчетная схема имеет вид рис. 3.16

Запишем систему уравнений по Кирхгофу и

$$\left\{ \begin{array}{l} i_1(0) - i_2(0) - i_3(0) = 0 \\ i_3(0)R_3 + U_c(0) - i_2(0)R_2 = 0 \\ i_1(0)R_1 + i_2(0)R_2 + U_L(0) = e(0) \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} i_1(0) = -8,375 \text{ A} \\ U_c(0) = -310,5 \text{ B} \\ e(0) = 260 \sin 30 = 130 \text{ B} \end{array} \right.$$

Решаем систему уравнений с учетом ННУ: $i_3(0) = 1,2 \text{ A}$;
 $i_2(0) = -9,58 \text{ A}$. $U_L(0) = 1063,5 \text{ B}$.

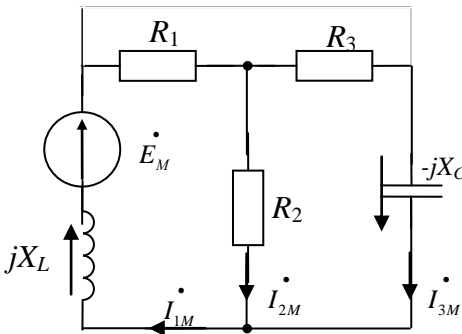


Рис. 3.17

Конечные условия $t(\infty)$, ключ разомкнут, режим, установившийся при синусоидальном входном напряжении, вычислим токи и напряжения, используя комплексы. Расчетная схема приведена на рис. 3.17:

$$\dot{I}_{1m} = \frac{\dot{E}_m}{\underline{Z}_{ex}}$$

$$\underline{Z}_{ex} = R_1 + jx_L + \frac{R_2(R_3 - jx_3)}{R_2 + R_3 - jx_3}$$

$$\underline{Z}_{ex} = 52 + j40 + \frac{52(52 - j25)}{104 - j25} = 79,42 + j34,04 = 86,43e^{j23,23^\circ} \text{ Ом}$$

$$\dot{I}_{1m} = \frac{260e^{i30^\circ}}{86,43e^{i23,23^\circ}} = 3,01e^{i6,77} \text{ A}$$

$$\dot{I}_{1m} = \dot{i}_1(t) = i_1(\infty) = 3,01 \sin(100t + 6,77^\circ) \text{ A}$$

$$\dot{I}_{cm} = \frac{\dot{I}_{1m} \cdot R_2}{R_2 + (R_3 - jx_{c3})} = 1,46e^{j20,28^\circ} \text{ A}$$

$$\dot{i}_{cm} = \dot{i}_c(t) = i_c(\infty) = 1,46 \sin(100t + 20,28^\circ) \text{ A.}$$

$$\dot{U}_{cm} = \dot{I}_{cm} \cdot (-jX_{C3}) = 1,46 e^{i20,28} \cdot 25 e^{-j90} = 36,56 e^{-j69,72} \text{ B.}$$

$$\dot{U}_c = \dot{u}_c(t) = u_c(\infty) = 36,56 \sin(100t - 69,72^\circ) \text{ B.}$$

В). Корни характеристического уравнения не зависят от входного воздействия, поэтому берем из предыдущих расчетов: $P_1 = -33,73c^{-1}$; $P_2 = -185,31c^{-1}$;

С). Определение постоянных интегрирования.

Найдем аналитическое выражение для напряжения на емкости $u_c(t)$ и тока через конденсатор $i_3(t)$:

$$\{U_c(t) = U_{cnp} + U_{cсв} = 36,56 \sin(100t - 69,72^\circ) + D_1 e^{P_1 t} + D_2 e^{P_2 t};$$

$$i_3(t) = c \frac{dU_c}{dt} = C [100 \cdot 36,56 \cos(100t - 69,72^\circ) + P_1 D_1 e^{P_1 t} + P_2 D_2 e^{P_2 t}]$$

при $t(0)$:

$$\begin{cases} U_c(0) = 36,56 \sin(-69,72^\circ) + D_1 + D_2 = -310,5 \\ i_3(0) = 4 \cdot 10^{-4} [3656 \cos(-69,72^\circ) - 33,73 D_1 - 185,3 D_2] = 1,2 \end{cases}$$

Решение системы дает: $D_1 = -325,9$; $D_2 = 49,75$.

С учетом постоянных запишем значения в переходном режиме.

$$U_c(t) = 36,56 \sin(100t - 69,72^\circ) - 325,9 e^{-33,73t} + 49,75 e^{-185,3t} \text{ B.}$$

$$i_3(t) = 1,46 \sin(100t + 20,29^\circ) + 4,4 e^{P_1 t} - 3,69 e^{P_2 t} \text{ A.}$$

Проверка:

$$\begin{cases} U_c(0) = 36,56 \sin(-69,72^\circ) - 325,9 + 49,75 = -310,5 \text{ B} \\ i_3(0) = 1,46 \sin(20,29^\circ) + 4,4 - 3,69 = 1,21 \text{ A} \end{cases}$$

Что соответствует НУ.

3.3. Расчет переходного процесса при несинусоидальном воздействии

Если на входе действует ЭДС $e(t) = 260 + 260\sin(100t + 30^\circ)$, то решение для любого тока или напряжения можно найти методом наложения. Запишем выражение для напряжения на емкости $U_c(t) = U_c^{(0)}(t) + U_c^{(1)}(t)$. С учетом расчетов $U_c(t) = 130 + 36,56\sin(100t - 69,72^\circ) - 180,7e^{-33,73t} + 34,5e^{-183,3t}$ В.

3.4. Исследование влияния параметра конденсатора C_3 на характер переходного процесса

Для анализа влияния C_3 на характер переходного процесса воспользуемся выражением:

$$2RL_1C_3p^2 + (3R^2C_3 + L_1)p + 2R = 0$$
$$p^2 + \frac{3R^2C_3 + L_1}{2RL_1C_3}p + \frac{1}{L_1C_3} = 0.$$

Подставим числовые значения всех элементов, кроме C_3 , и вычислим:

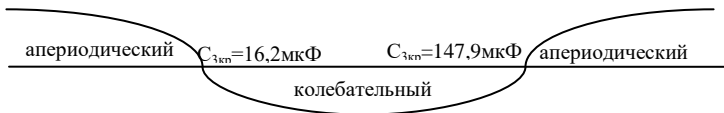
$$p^2 + \frac{8112C_3 + 0,4}{41,6C_3} + \frac{1}{0,4C_3} = 0.$$

Найти значение C_3 , при котором дискриминант квадратного уравнения равен нулю, что будет соответствовать критическому режиму переходного процесса:

$$\left(\frac{8112C_3 + 0,4}{41,6C_3} \right)^2 - \frac{40}{0,4C_3} = 0;$$

отсюда $C_{3кн} = 147,9$ мкФ и $C_3 = 16,2$ мкФ.

Исходя из полученного результата рис. 3.18, показаны области аperiodического и колебательного режимов.



3.5. График переходного процесса.

Для построения графиков необходимо определить временной интервал $0 \leq t \leq t_{III}$ переходного процесса, масштабы:

$$\text{зависимости тока } m_i = A / \text{см};$$

напряжения $m_U = B / \text{см}$ по оси «у» и времени $m_t = mc / \text{см}$ по оси «х». Каждый рисунок должен занимать половину листа.

Время переходного процесса $t_m = 5\tau$, где τ - постоянная переходного процесса. Если $P_1 \neq P_2 < 0$, то $\tau = 1 / |P_{\min}|$; при

$$P_1 \neq P_2 < 0 = -\bar{\sigma} \pm j\omega_{\text{св}} \quad \tau = 1 / |\bar{\sigma}|.$$

$$\text{В приведенном примере } t_m = \frac{5}{(P_{\min})} = \frac{5}{33,73} = 0,148\text{с.}$$

$$\text{Выбираем масштабы: } m_t = 0,02 \text{ с/см}, \quad m_U = 50 \text{ В/см};$$

На рис. 3.19, 3.20, 3.21 представлены графики напряжения на конденсаторе при различных воздействиях. Спустя время t_{III} , наблюдается стационарный режим $U_C(t) = U_C(\infty)$. При $e(t) = E_0$, $U_C^{(0)}(\infty) = 130\text{В}$ и в дальнейшем не меняется. При $e(t) = E_0 \sin(\omega t + \varphi)$, наблюдается неискаженная синусоида $U_C^{(1)}(\infty) = 36,56 \sin(100t - 69,72^\circ)\text{В}$.

$$e(t) = E_0 = 260\text{В}$$

$$\text{а) } U_C(t) = 130 + 142,2e^{-33,73t} - 15,2e^{-185,3t} \text{ В}$$

$$T_{III} = \frac{5}{33,73} \approx 0,148\text{с.}$$

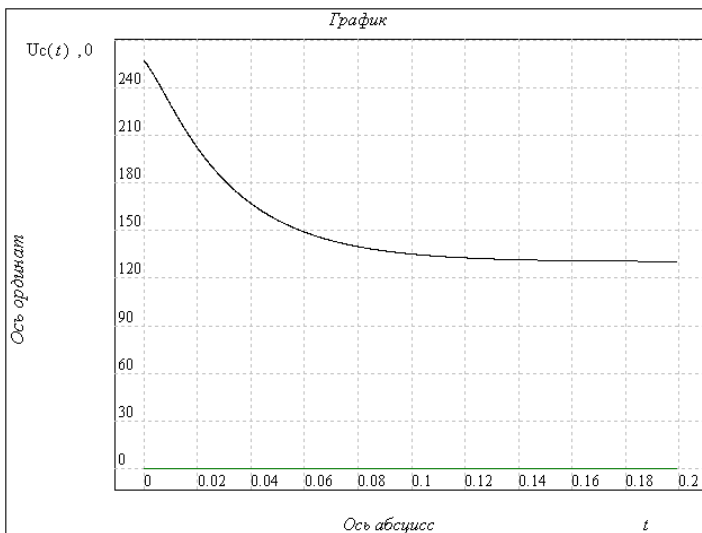


Рис. 3.19

b) $e(t) = 260\sin(100t + 30^\circ) \text{ В}$

$$U_C(t) = 36,56\sin(100t - 69,72^\circ) - 325,9e^{-33,73t} + 49,75e^{-185,3t} \text{ В}$$

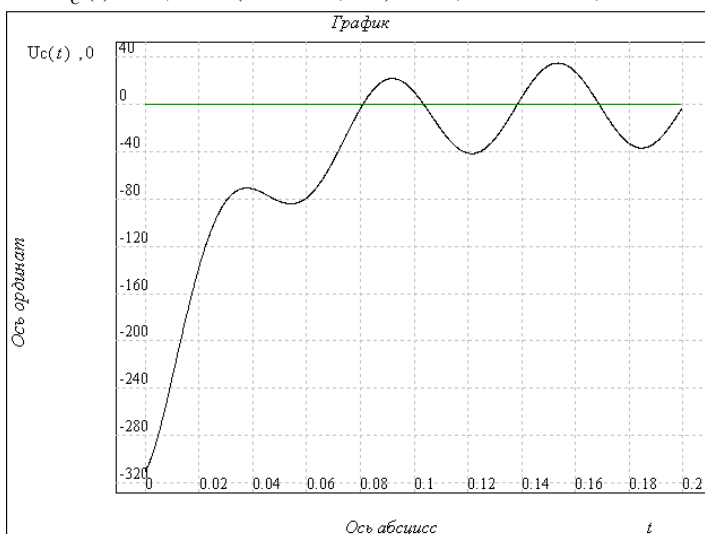


Рис. 3.20

c) $e(t) = 260 + 260\sin(100t + 30^\circ)B$

$$U_c(t) = 130 + 36,56\sin(100t - 69,72^\circ) - 180,7e^{-33,73t} + 34,5e^{-185,3t} B$$

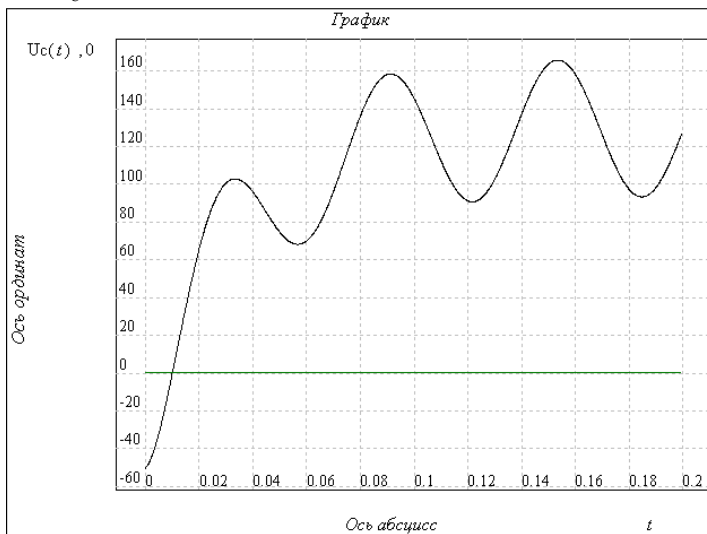


Рис. 3.21

Список литературы

1. Л.А. Бессонов. Теоретические основы электротехники. – Изд-во: «Гардарики», 2000. – 637 с.
2. Г.В. Зевеке и др. Основы теории цепей. «Энергоатомиздат», 1989. – 528 с.
3. В.М. Дмитриев и др. Теоретические основы электротехники, ч. II, учебное пособие, ТМЦДО, 2001. – 200 с.
4. В.М. Дмитриев. Математика на Макрокалькуляторе: учеб. пособие / В.М. Дмитриев, Т.В. Ганджа, Е.В. Истигечева; Федеральное агентство по образованию, Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, Высший колледж информатики, электроники и менеджмента. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. – 110 с.