

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ
СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФИЛИАЛ
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ СВЯЗИ И
ИНФОРМАТИКИ»**



КАФЕДРА ОБЩЕНАУЧНОЙ ПОДГОТОВКИ

А.В. Бородин

Я.Б. Константинова

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Методическое пособие

по проведению практических занятий

(Направление подготовки 11.03.02)

Ростов-на-Дону

2019 г.

Бородин А.В., Константинова Я.Б. «Теория электрических цепей». Методическое пособие по проведению практических занятий; Ростов-на-Дону: Северо-Кавказский филиал МТУСИ. 2019. – 29 с.

Составители: доцент кафедры ОНП Бородин А.В.,
доцент кафедры ОНП Константинова Я.Б.

Рецензент: Зав. кафедрой ИТСС СКФ МТУСИ, к.т.н. доц. Юхнов В.И.

Издание рассмотрено и утверждено
на заседании кафедры ОНП
26.08.2019 года (протокол № 1)

Целями изучения дисциплины «Теория электрических цепей» являются овладение современными методами анализа, синтеза и расчета электрических цепей, методами моделирования и исследования различных режимов электрических цепей на компьютерах.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №1

Расчет электрических цепей постоянного тока различными методами

1. Первый и второй законы Кирхгофа (метод непосредственного применения законов Кирхгофа)

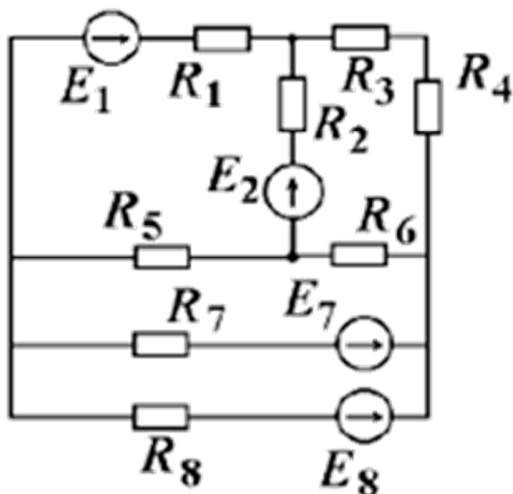
Дано

$R_1=16 \text{ Ом};$
 $R_2=31 \text{ Ом};$
 $R_3=24 \text{ Ом};$
 $R_4=13 \text{ Ом};$
 $R_5=33 \text{ Ом};$
 $R_6=40 \text{ Ом};$
 $R_7=22 \text{ Ом};$
 $R_8=7 \text{ Ом};$
 $E_1=30 \text{ В};$
 $E_2=24 \text{ В};$
 $E_7=16 \text{ В};$
 $E_8=11 \text{ В}.$

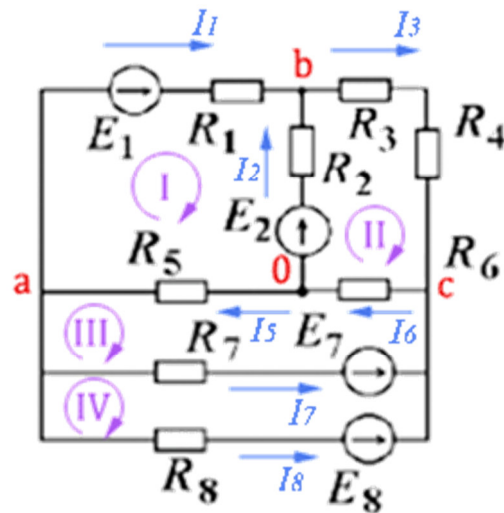
Найти

Токи в цепи непосредственным применением **законов Кирхгофа**.

Решение



Составляем уравнения по законам Кирхгофа. **Первый закон Кирхгофа** говорит о том, что сумма втекающих и вытекающих токов в любом узле схемы равна нулю. **Второй закон Кирхгофа** гласит, что алгебраическая сумма падений напряжений по замкнутому контуру равна сумме ЭДС в этом контуре. В приведенной схеме $m=7$ ветвей и $n=4$ узла. Следовательно, по первому закону Кирхгофа должно быть составлено $n-1=3$ уравнения, а по второму закону Кирхгофа $m-(n-1)=4$ уравнения. Размечаем произвольно выбранные направления токов, контуры обходов, узлы схемы.



$$\begin{cases} I_6 = I_5 + I_2 \text{ (первый закон Кирхгофа для узла "0")} \\ I_5 = I_1 + I_7 + I_8 \text{ (первый закон Кирхгофа для узла а)} \\ I_1 + I_2 = I_3 \text{ (первый закон Кирхгофа для узла "b")} \\ E_1 - E_2 = I_1 R_1 - I_2 R_2 + I_5 R_5 \text{ (второй закон Кирхгофа для контура I)} \\ E_2 = I_2 R_2 + I_3 (R_3 + R_4) + I_6 R_6 \text{ (второй закон Кирхгофа для контура II)} \\ -E_7 = -I_7 R_7 - I_5 R_5 - I_6 R_6 \text{ (второй закон Кирхгофа для контура III)} \\ E_7 - E_8 = I_7 R_7 - I_8 R_8 \text{ (второй закон Кирхгофа для контура IV)} \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_6 = I_5 + I_2 \\ I_5 = I_1 + I_7 + I_8 \\ I_1 + I_2 = I_3 \\ 30 - 24 = 16I_1 - 31I_2 + 33I_5 \\ 24 = 31I_2 + (24 + 13)I_3 + 40I_6 \\ -16 = -22I_7 - 33I_5 - 40I_6 \\ 16 - 11 = 22I_7 - 7I_8 \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_6 = I_5 + I_2 \\ I_5 = I_1 + I_7 + I_8 \\ I_1 + I_2 = I_3 \\ 6 = 16I_1 - 31I_2 + 33I_5 \\ 24 = 31I_2 + 37I_3 + 40I_6 \\ -16 = -22I_7 - 33I_5 - 40I_6 \\ 5 = 22I_7 - 7I_8 \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_2 + I_5 + I_6 = 0 \\ I_1 + I_5 + I_7 + I_8 = 0 \\ I_1 + I_2 + I_3 = 0 \\ 16I_1 - 31I_2 + 33I_5 = 6 \\ 31I_2 + 37I_3 + 40I_6 = 24 \\ 33I_5 + 40I_6 + 22I_7 = 16 \\ 22I_7 - 7I_8 = 5 \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 16 & -31 & 0 & 33 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 31 & 37 & 0 & 40 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 33 & 40 & 22 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 22 & -7 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_7 \\ I_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 6 \\ 24 \\ 16 \\ 5 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_7 \\ I_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 16 & -31 & 0 & 33 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 31 & 37 & 0 & 40 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 33 & 40 & 22 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 22 & -7 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 6 \\ 24 \\ 16 \\ 5 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_7 \\ I_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,265 \\ 0,083 \\ 0,347 \\ 0,131 \\ 0,214 \\ 0,140 \\ -0,273 \end{pmatrix}$$

Ответ:

$I_1=0,265$ A; $I_2=0,082$ A; $I_3=0,347$ A; $I_5=0,131$ A; $I_6=0,214$ A; $I_7=0,140$ A;
 $I_8=-0,273$ A.

2. Метод контурных токов (МКТ).

Дано

$R_1=16 \text{ Ом};$

$R_2=31 \text{ Ом};$

$R_3=24 \text{ Ом};$

$R_4=13 \text{ Ом};$

$R_5=33 \text{ Ом};$

$R_6=40 \text{ Ом};$

$R_7=22 \text{ Ом};$

$R_8=7 \text{ Ом};$

$E_1=30 \text{ В};$

$E_2=24 \text{ В};$

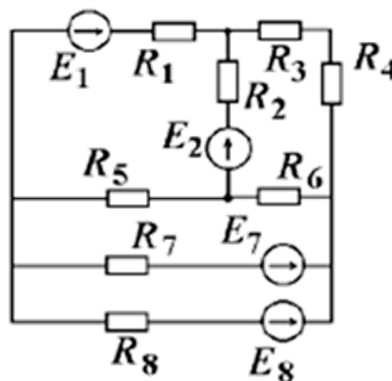
$E_7=16 \text{ В};$

$E_8=11 \text{ В}.$

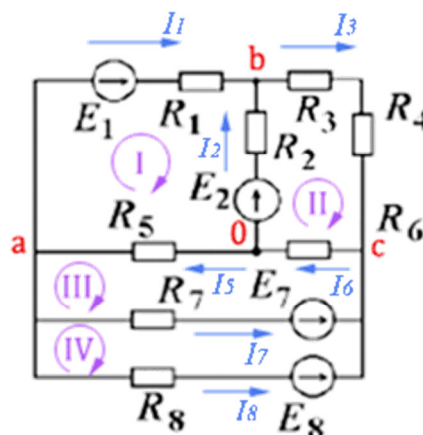
Найти

Токи в цепи **методом контурных токов**.

Решение



Размечаем произвольно выбранные направления токов, контуры обходов, узлы схемы.



Составим матричное уравнение контурных токов.

$(Z)(I)=(U)$, где

(Z) — матрица контурных сопротивлений;

(I) — матрица неизвестных контурных токов;

(U) — матрица ЭДС контуров.

$$(Z) = \begin{pmatrix} R_1 + R_2 + R_5 & -R_2 & -R_5 & 0 \\ -R_2 & R_2 + R_3 + R_4 + R_6 & -R_6 & 0 \\ -R_5 & -R_6 & R_5 + R_6 + R_7 & -R_7 \\ 0 & 0 & -R_7 & R_7 + R_8 \end{pmatrix}$$

$$(Z) = \begin{pmatrix} 16 + 31 + 33 & -31 & -33 & 0 \\ -31 & 31 + 24 + 13 + 40 & -40 & 0 \\ -R_5 & -40 & 33 + 40 + 22 & -22 \\ 0 & 0 & -22 & 22 + 7 \end{pmatrix}$$

$$(Z) = \begin{pmatrix} 80 & -31 & -33 & 0 \\ -31 & 108 & -40 & 0 \\ -33 & -40 & 95 & -22 \\ 0 & 0 & -22 & 29 \end{pmatrix}$$

$$(I) = \begin{pmatrix} I_I \\ I_{II} \\ I_{III} \\ I_{IV} \end{pmatrix}$$

$$(U) = \begin{pmatrix} E_1 - E_2 \\ E_2 \\ -E_7 \\ E_7 - E_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 30 - 24 \\ 24 \\ -16 \\ 16 - 11 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6 \\ 24 \\ -16 \\ 5 \end{pmatrix}$$

$$(I) = (Z)^{-1}(U) = \begin{pmatrix} 80 & -31 & -33 & 0 \\ -31 & 108 & -40 & 0 \\ -33 & -40 & 95 & -22 \\ 0 & 0 & -22 & 29 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 6 \\ 24 \\ -16 \\ 5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,265 \\ 0,347 \\ 0,133 \\ 0,273 \end{pmatrix}$$

$$I_I = 0,265 \text{ A};$$

$$I_{II} = 0,347 \text{ A};$$

$$I_{III} = 0,133 \text{ A};$$

$$I_{IV} = 0,273 \text{ A}.$$

Определив все **контурные токи**, выразим через них токи в ветвях:

$$I_1 = I_I = 0,265 \text{ A};$$

$$I_2 = I_{II} - I_I = 0,347 - 0,265 = 0,082 \text{ A};$$

$$I_3 = I_{II} = 0,347 \text{ A};$$

$$I_5 = I_I - I_{III} = 0,265 - 0,133 = 0,132 \text{ A};$$

$$I_6 = I_{II} - I_{III} = 0,347 - 0,133 = 0,214 \text{ A};$$

$$I_7 = I_{IV} - I_{III} = 0,273 - 0,133 = 0,140 \text{ A};$$

$$I_8 = -I_{IV} = -0,273 \text{ A}.$$

Найденные токи совпадают с токами, вычисленными с использованием законов Кирхгофа, что подтверждает правильность решения.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №2

Расчет разветвленных цепей постоянного тока

Метод узловых потенциалов (МУП) - метод узловых напряжений

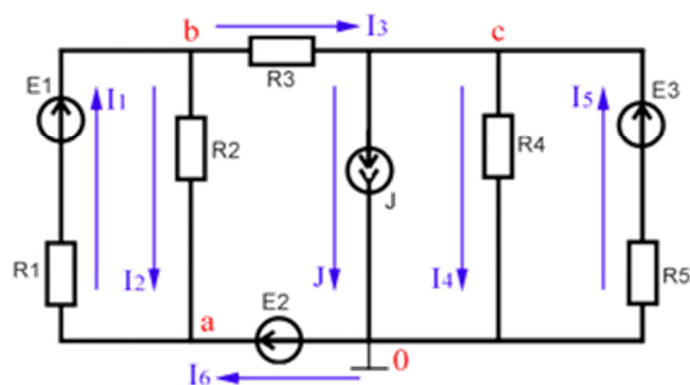
Дано

$E_1 = 9 \text{ В};$
 $E_2 = 13 \text{ В};$
 $E_3 = 15 \text{ В};$
 $J = 1,4 \text{ А};$
 $R_1 = 12 \text{ Ом};$
 $R_2 = 16 \text{ Ом};$
 $R_3 = 9 \text{ Ом};$
 $R_4 = 5 \text{ Ом};$
 $R_5 = 10 \text{ Ом}$

Найти

Токи в ветвях **методом узловых потенциалов (узловых напряжений)**:

Решение



Составим матричное уравнение узловых потенциалов.

$$(Y)(U) = (I), \text{ где:}$$

(Y) — матрица проводимостей ветвей;

(U) — матрица неизвестных потенциалов;

(I) — матрица втекающих или вытекающих из узлов токов.
 Заметим, что известной матрицей является матрица токов, поэтому источники ЭДС включенные последовательно с резисторами необходимо заменить источниками тока номиналом E/R , соединенными с резисторами параллельно. Потенциал точки а можно записать сразу $U_a = E_2 = 13$ В:

$$(Y) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) & \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} & -\frac{1}{R_3} \\ 0 & -\frac{1}{R_3} & \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} \end{pmatrix}$$

$$(U) = \begin{pmatrix} E_2 \\ U_b \\ U_c \end{pmatrix}$$

$$(I) = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{E_1}{R_1} \\ \frac{E_3}{R_5} - J \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) & \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} & -\frac{1}{R_3} \\ 0 & -\frac{1}{R_3} & \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_2 \\ U_b \\ U_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{E_1}{R_1} \\ \frac{E_3}{R_5} - J \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -\left(\frac{1}{12} + \frac{1}{16}\right) & \frac{1}{12} + \frac{1}{16} + \frac{1}{9} & -\frac{1}{9} \\ 0 & -\frac{1}{9} & \frac{1}{9} + \frac{1}{5} + \frac{1}{10} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 13 \\ U_b \\ U_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{9}{12} \\ \frac{15}{10} - 1,4 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -0,146 & 0,257 & -0,111 \\ 0 & -0,111 & 0,411 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 13 \\ U_b \\ U_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0,75 \\ 0,1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{cases} -0,146 \cdot 13 + 0,257U_b - 0,111U_c = 0,75 \\ -0,111U_b + 0,411U_c = 0,1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} -1,898 + 0,257U_b - 0,111U_c = 0,75 \\ U_b = 3,703U_c - 0,901 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 0,257(3,703U_c - 0,901) - 0,111U_c = 2,648 \\ U_b = 3,703U_c - 0,901 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 0,841U_c = 2,88 \\ U_b = 3,703U_c - 0,901 \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_c = 3,424 \text{ В} \\ U_b = 11,78 \text{ В} \end{cases}$$

Зная потенциалы узлов, используем закон Ома и найдем токи в ветвях:

$$I_1 = \frac{U_a - (U_b - E_1)}{R_1} = \frac{13 - (11,78 - 9)}{12} = 0,852 \text{ А}$$

$$I_2 = \frac{U_b - U_a}{R_2} = \frac{11,78 - 13}{16} = -0,076 \text{ А}$$

$$I_3 = \frac{U_b - U_c}{R_3} = \frac{11,78 - 3,42}{9} = 0,929 \text{ А}$$

$$I_4 = \frac{U_c}{R_4} = \frac{3,42}{5} = 0,684 \text{ А}$$

$$I_5 = \frac{-(U_c - E_3)}{R_5} = \frac{-(3,42 - 15)}{10} = 1,158 \text{ А}$$

Для шестой ветви можно записать первый закон Кирхгофа:

$$I_6 = J + I_4 - I_5 = 1,4 + 0,684 - 1,158 = 0,926 \text{ А}$$

Ответ: $I_1=0,852 \text{ А}$; $I_2=-0,076 \text{ А}$; $I_3=0,929 \text{ А}$; $I_4=0,684 \text{ А}$; $I_5=1,158 \text{ А}$; $I_6=0,926 \text{ А}$.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 3

Расчет переходных процессов в цепях первого и второго порядков

Переходные процессы 1-го рода (первого порядка).

Дано

$$E_0 = 100 \text{ В};$$

$$a \cdot T = 2;$$

$$L = 2 \text{ мГн} = 0,02 \text{ Гн};$$

$$C = 10 \text{ мкФ} = 10^{-5} \text{ Ф};$$

$$R_1 = 1 \text{ Ом};$$

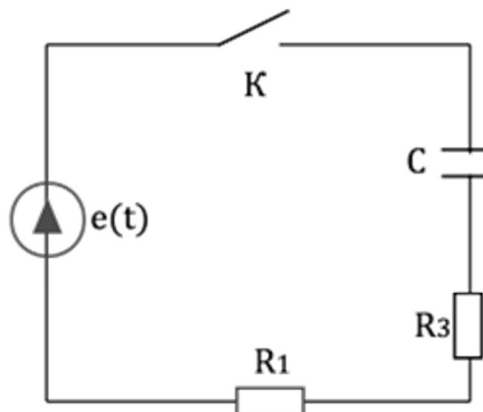
$$R_2 = 4 \text{ Ом};$$

$$R_3 = 1 \text{ Ом}.$$

Найти

$u_C(t)$ - ? (численно и график);

Решение



Находим характеристическое сопротивление цепи p , для этого приравняем к нулю входное сопротивление цепи:

$$Z_{\text{вх}} = R_1 + R_3 + \frac{1}{pC} = 0$$

$$p(R_1 + R_3) = -\frac{1}{C}$$

$$p = -\frac{1}{(R_1 + R_3)C} = -\frac{1}{(1 + 1)10^{-5}} = -5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$$

$$\tau = \left| \frac{1}{p} \right| = \left| \frac{1}{-5 \cdot 10^4} \right| = 2 \cdot 10^{-5} \text{ с} = 20 \text{ мкс}$$

Постоянная времени цепи:

Находим установившееся значение напряжения на ёмкости. При постоянном значении ЭДС ёмкость эквивалентна разрыву – следовательно, ток в цепи не потечёт: $u_{C \text{ уст}} = E$;

Находим докоммутационное значение напряжения на ёмкости. Цепь разомкнута, в ней нет источников энергии, следовательно, все падения напряжений на элементах равны нулю: $u_C(0_-) = u_C(0) = 0$;

Общее решение для напряжения на ёмкости можно записать в виде:

$$u_C(t) = u_{C \text{ уст}} + Ae^{pt}$$

Находим постоянную интегрирования A из начальных условий:

$$u_C(0) = E + Ae^{p \cdot 0} = E + A$$

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

Все неизвестные определены, можно записать ответ:

$$u_C(t) = E - Ee^{pt} = E_0(1 - e^{pt}) = 100(1 - e^{-5 \cdot 10^4 t})$$

Находим предел построения графика:

$$t_{\max} = 4\tau = 4 \cdot 2 \cdot 10^{-5} = 8 \cdot 10^{-5} \text{ с} = 80 \text{ мкс};$$

$$u_C(t) = E - Ee^{pt} = E_0(1 - e^{pt}) = 100(1 - e^{-5 \cdot 10^4 t})$$

Пунктиром указано значение ЭДС в цепи.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 4

Применение операторного метода для расчета переходного процесса в электрической цепи

Переходные процессы 2-го рода (второго порядка)

Дано

$$R = 5 \text{ Ом};$$

$$L = 0,01 \text{ Гн};$$

$$C = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Ф};$$

$$E = 98 \text{ В};$$

Найти

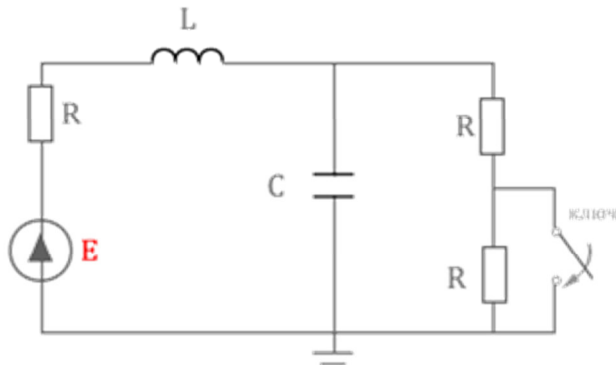
$$i_C(t) \text{ — ? (классический метод)}$$

$$i_C(t) \text{ — ? (операторный метод — свободные составляющие)}$$

$$i_C(t) \text{ — ? (график)}$$

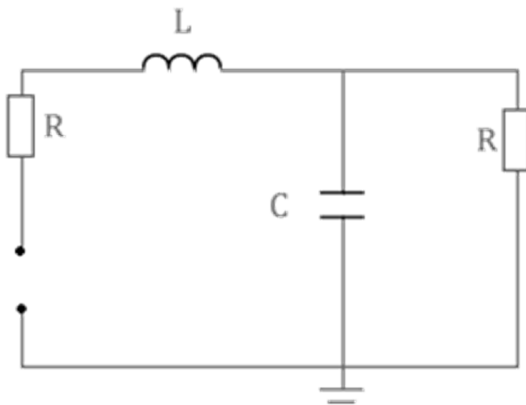
Решение

Схема цепи:



Классический метод.

Расчет характеристического сопротивления цепи р. Найдем входное сопротивление цепи и приравняем его к нулю. При поиске входного сопротивления считается, что все коммутации произошли, ЭДС заменяется закороткой, источники тока разрывом. Затем любую точку схемы преобразуют в два зажима и считают относительно них сопротивление цепи:



$$Z_{\text{BX}}(p) = 0$$

$$R + pL + \frac{R \cdot (1/pC)}{R + 1/pC} = 0$$

$$R^2 + \frac{R}{pC} + pLR + \frac{L}{C} + \frac{R}{pC} = 0$$

$$R^2p + p^2LR + \frac{L}{C}p + \frac{2R}{C} = 0$$

$$p^2 + p \frac{\left(R^2 + \frac{L}{C}\right)}{RL} + \frac{2R}{C \cdot RL} = 0$$

$$p^2 + p \left(\frac{R}{L} + \frac{1}{RC} \right) + \frac{2}{LC} = 0$$

$$p^2 + p \left(\frac{5}{0,01} + \frac{1}{2 \cdot 10^{-4} \cdot 5} \right) + \frac{2}{2 \cdot 10^{-4} \cdot 0,01} = 0$$

$$p^2 + p(500 + 1000) + 10^6 = 0$$

$$p^2 + 1500p + 10^6 = 0$$

$$D = k^2 - ac = 750^2 - 10^6 = -437500$$

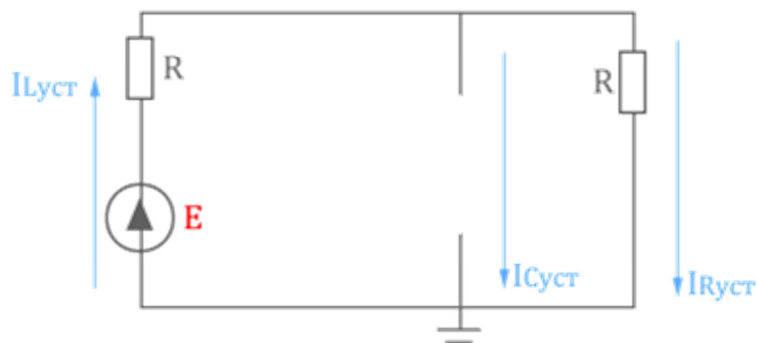
$$p_{1,2} = \frac{-k \pm \sqrt{D}}{a} = -750 \pm \sqrt{-437500} = -750 \pm 661j$$

$$\delta = 750 \text{ c}^{-1}; \omega_0 = 661 \text{ c}^{-1}.$$

Характер переходного процесса при комплексно-сопряженных корнях

определяется выражением: $x(t) = x_{\text{уст}} + Ae^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi)$

Находим установившиеся значения требуемых величин. Рисуем эквивалентную схему по прошествии большого количества времени. Ключ сработал, все **переходные процессы** завершены. На постоянном токе индуктивность эквивалентна коротке, ёмкость разрыву:



Установившееся значение искомого тока: $i_{c\text{уст}}=0$ А Анализ докоммутационного состояния для нахождения сохраняющихся величин: напряжения на ёмкости и тока через индуктивность. На постоянном токе индуктивность эквивалентна коротке, ёмкость разрыву.

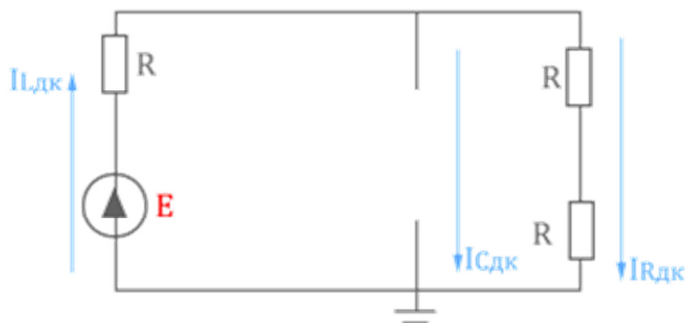
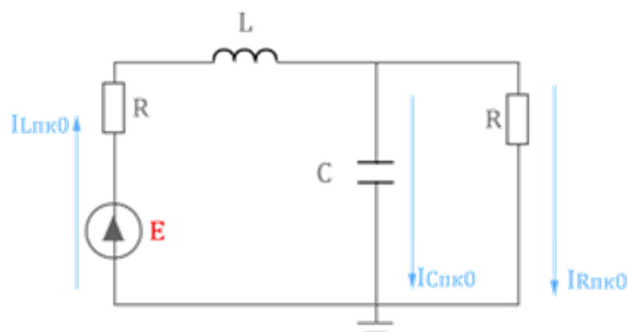


Схема цепи до коммутации:

$$I_{R\text{дк}} = I_{L\text{дк}} = \frac{E}{R + 2R} = \frac{98}{5 + 10} = 6,53 \text{ А}$$

$$U_{C\text{дк}} = I_{L\text{дк}} \cdot 2R = 6,53 \cdot 10 = 65,33 \text{ В}$$

Анализ начальных условий нулевого порядка. Рассматривается момент времени сразу после коммутации.



По законам коммутации можно записать:

$$I_{Lпк0} = I_{Lдк} = 6,53 \text{ A};$$

$$U_{Cпк0} = U_{Cд} = 65,33 \text{ В};$$

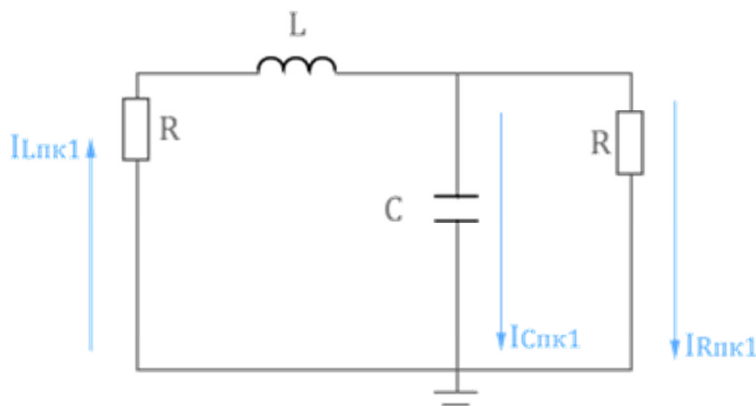
Тогда:

$$I_{Rпк0} = U_{Cпк0} / R = 65,33 / 5 = 13,07 \text{ A};$$

$$I_{Cпк0} = I_{Lпк0} - I_{Rпк0} = 6,53 - 13,07 = -6,53 \text{ A};$$

$$U_{Lпк0} = E - R I_{Lпк0} - U_{Cпк0} = 98 - 5 \cdot 6,53 - 65,33 = 0 \text{ В}.$$

Анализ начальных условий первого порядка (производных от начальных величин). Рассматривается момент времени сразу после коммутации. Т.к. ЭДС постоянна, а эквивалентная схема рисуется для производных величин, то источник будет отсутствовать.



$$u_C(t) = \frac{1}{C} \int i_C(t) dt$$

$$U_{Cпк1} = U'_C(0_+) = \frac{1}{C} I_C$$

$$U_{Cпк1} = \frac{1}{C} I_{Cпк0} = \frac{1}{2 \cdot 10^{-4}} \cdot (-6,53) = -32650 \text{ В/с}$$

$$u_L(t) = L \cdot \frac{di_L(t)}{dt}$$

$$U_L = L \cdot I'_L$$

$$I_{Lпк1} = \frac{U_{Lпк0}}{L} = \frac{0}{0,01} = 0 \text{ А/с}$$

$$I_{Rпк1} = \frac{U_{Cпк1}}{R} = \frac{-32650}{5} = -6530 \text{ А/с}$$

$$I_{Cпк1} = I_{Lпк1} - I_{Rпк1} = 0 - (-6530) = 6530 \text{ А/с}$$

Определение независимых констант из начальных условий. Запишем выражение для тока через ёмкость для начального момента времени. Также

запишем выражение для производной тока через ёмкость в начальный момент времени. Решим систему уравнений, и найдём неизвестные A и φ .
 $i_C(0) = -6,53 \text{ A}$; $i_C'(0) = 6530 \text{ A/c}$; $i_{C \text{ уст}} = 0 \text{ A}$;

$$\begin{cases} i_C(0) = i_{L \text{ уст}} + A \sin(\varphi) \\ i_C'(0) = -\delta A \sin(\varphi) + A \omega_0 \cos(\varphi) \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_C(0) = A \sin(\varphi) \\ i_C'(0) = -\delta A \sin(\varphi) + A \omega_0 \cos(\varphi) \end{cases}$$

$$\begin{cases} A = \frac{i_C(0)}{\sin(\varphi)} \\ i_C'(0) = -\delta \frac{i_C(0)}{\sin(\varphi)} \sin(\varphi) + \frac{i_C(0)}{\sin(\varphi)} \omega_0 \cos(\varphi) \end{cases}$$

Из второго уравнения следует:

$$i_C'(0) = -\delta i_C(0) + \frac{i_C(0) \omega_0}{\operatorname{tg}(\varphi)}$$

$$\operatorname{tg}(\omega) = \frac{i_C(0) \omega_0}{i_C'(0) + \delta i_C(0)} = \frac{-6,53 \cdot 661}{6530 - 750 \cdot 6,53} = -2,64$$

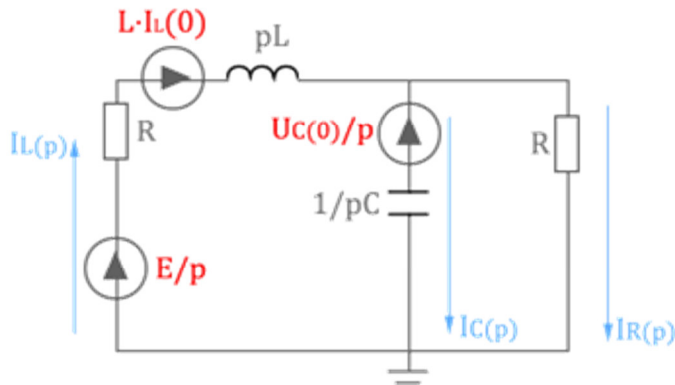
$$\varphi = \arctg(\operatorname{tg}(\varphi)) = \arctg(-2,64) = -69,3^\circ$$

$$A = \frac{i_C(0)}{\sin(\varphi)} = \frac{-6,53}{\sin(-69,3^\circ)} = 6,98$$

$$i_C(t) = 6,98 \cdot e^{-750t} \sin(661t - 69,3^\circ)$$

Операторный метод.

Рисуем операторную схему замещения:



Делаем преобразование Лапласа для источника ЭДС:

$$E(t)=98;$$

$$E(p)=98/p;$$

Начальные значения для тока через индуктивность и напряжения на ёмкости возьмем из предыдущего расчета:

$$I_L(0)=6,53 \text{ A};$$

$$U_C(0)=65,33 \text{ V};$$

Найдем потенциал точки а методом двух узлов.

Обозначим не заземленный узел «а», тогда:

$$Y \cdot U_a = I;$$

$U_a = I/Y$, где I — втекающие в узел токи, а Y — проводимость ветвей.

$$U_a(p) = \frac{\frac{E/p + L \cdot I_L(0)}{R + pL} + \frac{U_C(0)/p}{1/pC}}{\frac{1}{R + pL} + \frac{1}{R} + pC}$$

$$I_C(p) = \frac{U_a(p)}{\frac{1}{pC}} = pC \left[\frac{\frac{E/p + L \cdot I_L(0)}{R + pL} + \frac{U_C(0)/p}{1/pC}}{\frac{1}{R + pL} + \frac{1}{R} + pC} \right] =$$

$$= C \left[\frac{\frac{E + LI_L(0)p}{R + pL} + U_C(0)Cp}{\frac{1}{R + pL} + \frac{1}{R} + pC} \right] = C \left[\frac{(E + LI_L(0)p)R + U_C(0)CR^2p + U_C(0)CRp^2L}{R + R + pL + pCR^2 + p^2CRpL} \right] =$$

$$= C \left[\frac{(E + LI_L(0)p)R + U_C(0)CR^2p + U_C(0)CRp^2L}{2R + p(L + CR^2) + p^2CRL} \right] =$$

$$= C \left[\frac{(E + LI_L(0)p)R + U_C(0)CR^2p + U_C(0)CRp^2L}{RCL \left(p^2 + p \left(\frac{1}{RC} + \frac{R}{L} \right) + \frac{2}{LC} \right)} \right] =$$

$$\begin{aligned}
&= C \left[\frac{E + p(LI_L(0) + U_C(0)CR) + p^2 U_C(0)CL}{CL \left(p^2 + p \left(\frac{1}{RC} + \frac{R}{L} \right) + \frac{2}{LC} \right)} \right] = \\
&= C \left[\frac{U_C(0)CL \left(p^2 + p \left(\frac{I_L(0)}{U_C(0)C} + \frac{R}{L} \right) + \frac{E}{U_C(0)} \cdot \frac{1}{LC} \right)}{CL \left(p^2 + p \left(\frac{1}{RC} + \frac{R}{L} \right) + \frac{2}{LC} \right)} \right] = \\
&= U_C(0)C \cdot \frac{p^2 + p \left(\frac{I_L(0)}{U_C(0)C} + \frac{R}{L} \right) + \frac{E}{U_C(0)} \cdot \frac{1}{LC}}{p^2 + p \left(\frac{1}{RC} + \frac{R}{L} \right) + \frac{2}{LC}} \\
&= 65,33 \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{p^2 + p \left(\frac{6,53}{65,33 \cdot 2 \cdot 10^{-4}} + \frac{5}{0,01} \right) + \frac{98}{65,33} \cdot \frac{1}{0,01 \cdot 2 \cdot 10^{-4}}}{p^2 + p \left(\frac{1}{5 \cdot 2 \cdot 10^{-4}} + \frac{5}{0,01} \right) + \frac{2}{0,01 \cdot 2 \cdot 10^{-4}}} = \\
&= 13,07 \cdot 10^{-3} \left[\frac{p^2 + 1000p + 7,5 \cdot 10^5}{(p + 750 + 661,4j)(p + 750 - 661,4j)} \right] \\
i_C(t) &= 13,07 \cdot 10^{-3} \cdot \left[\frac{(-750 - 661j)^2 + 1000(-750 - 661j) + 7,5 \cdot 10^5}{(-661j \cdot 2)} \cdot e^{(-750 - 661j)t} \right] + \\
&+ 13,07 \cdot 10^{-3} \cdot \left[\frac{(-750 + 661j)^2 + 1000(-750 + 661j) + 7,5 \cdot 10^5}{(661j \cdot 2)} \cdot e^{(-750 + 661j)t} \right] = \\
&= (-3,268 + 1,242j)e^{(-750 - 661j)t} + (-3,268 - 1,242j)e^{(-750 + 661j)t} = \\
&= e^{-750t} [-3,268 \cdot \cos(661t) + 1,242 \sin(661t) - 3,268 \cos(661t) + 1,242 \sin(661t)] = \\
&= e^{-750t} [-6,53 \cdot \cos(661t) + 2,48 \sin(661t)]
\end{aligned}$$

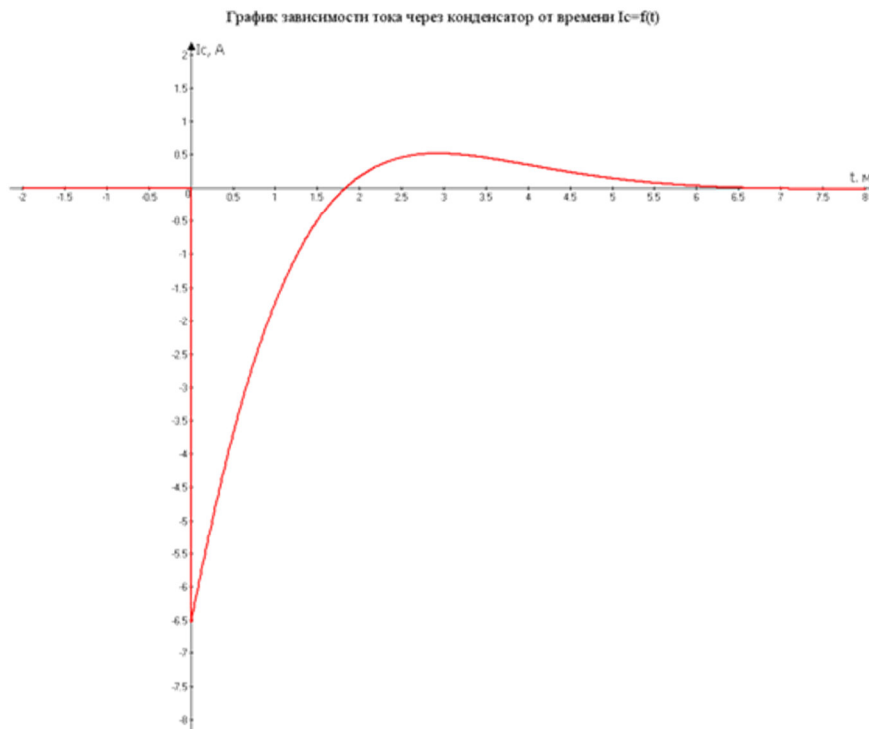
Используя формулу дополнительного угла:

$a\cos x + b\sin x = \sqrt{a^2 + b^2} \cdot \cos(x - \alpha)$, где α находится из уравнений

$$\begin{cases} \cos \alpha = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} = \frac{-6,53}{\sqrt{6,53^2 + (-2,48)^2}} = -0,936 \\ \sin \alpha = \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}} = \frac{2,48}{\sqrt{6,53^2 + (-2,48)^2}} = 0,355 \end{cases} \rightarrow \alpha = 159,4^\circ$$

$$i_c(t) = 6,98 \cdot e^{-750t} \cos(661t - 159,4^\circ) = 6,98 \cdot e^{-750t} \sin(661t - 69,4^\circ)$$

По заданию требуется найти только свободные составляющие тока, но так как его установившееся значение равно нулю, то получен полный ток. Зависимость ёмкостного тока совпадает с полученной классическим методом, что подтверждает правильность расчетов:



ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 5

Передаточная функция электрической цепи по напряжению, её АЧХ и ФЧХ

Контрольные вопросы:

1. Какие частотные характеристики существуют?
2. Какие виды передаточных характеристик существует?
3. Что такое воздействие на ЧП?
4. Что такое реакция ЧП на воздействие?
5. Как связана передаточная функция ЧП с воздействием и реакцией?
6. Какое воздействие и какая реакция ЧП используются при расчете передаточной функции по напряжению?
7. Дайте определение передаточной функции по напряжению?
8. Дайте определение АЧХ передаточной функции по напряжению ЧП?
9. Дайте определение ФЧХ передаточной функции по напряжению ЧП?
10. Как составляется операторная схема замещения ЧП?
11. Как определить передаточную функцию по напряжению в операторной форме?
12. Как записать выражение передаточной функции по напряжению в комплексной форме?
13. Как определить передаточную функцию по напряжению с помощью матрицы А - параметров ЧП?
14. Как определить передаточную функцию цепи, состоящей из 2 каскадно-соединенных ЧП?
15. Правила расчета выражения АЧХ передаточной функции ЧП в комплексной форме.
16. Правила расчета выражения ФЧХ передаточной функции ЧП в комплексной форме.
17. Правила выбора диапазона частот, в котором нужно рассчитывать АЧХ

ЧП?

18. Правила построения графиков АЧХ и ФЧХ?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 6

Комплексная передаточная функция цепи, охваченной обратной связью

Контрольные вопросы:

1. Что такое обратная связь?
2. Какая обратная связь называется полезной, а какая паразитной?
3. Чем отличается положительная обратная связь от отрицательной обратной связи?
4. Для чего используется положительная обратная связь?
5. Для чего используется отрицательная обратная связь?
6. Чем отличается последовательная обратная связь по току от такой связи же по напряжению?
7. Как влияет положительная обратная связь на передаточную функцию ЧП по напряжению?
8. Как влияет отрицательная обратная связь на передаточную функцию ЧП по напряжению?
9. Как влияет отрицательная обратная связь на входное сопротивление ЧП?
10. Что такое глубина обратной связи и чему она равна?
11. Что такое фактор обратной связи и чему он равен?
12. Достоинства отрицательной обратной связи?
13. Что такое глубокая отрицательная связь?
14. Как влияет глубокая отрицательная связь на модуль передаточной функции ЧП, охваченного этой связью?
15. Чему равен модуль передаточной функции по напряжению ЧП, охваченного глубокой отрицательной связью, докажете это?

16. Как влияет обратная связь на работу резистивного усилителя, построенного на операционном усилителе?
17. Какие свойства приобретает операционный усилитель при охвате его отрицательной обратной связью?
18. Использование положительной обратной связи для создания автогенераторов?
19. Критерии устойчивости электрических цепей, охваченных положительной обратной связью.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 7

Расчет первичных и вторичных параметров длинной линии

Контрольные вопросы:

1. В каких случаях линия передачи энергии рассматривается как цепь с распределенными параметрами?
2. Запишите формулу для расчета комплексного волнового сопротивления линии?
3. Запишите формулу для расчета модуля комплексного волнового сопротивления длинной линии?
4. Нарисуйте графики зависимости модуля волнового сопротивления линии от частоты.
5. Запишите формулу для расчета аргумента комплексного волнового сопротивления линии?
6. Нарисуйте график изменения аргумента волнового сопротивления линии от частоты?
7. Какой характер имеет комплексное волновое сопротивление линии?
8. Запишите формулу для расчета коэффициента распространения электромагнитной волны вдоль линии?

9. Какой физический смысл коэффициента распространения электромагнитной волны вдоль линии?
10. Запишите выражение коэффициента распространения электромагнитной волны вдоль линии для линии с потерями и линии без потерь?
11. С какой скоростью распространяется электромагнитная волна вдоль линии, дайте ее определение?
12. Запишите и объясните формулу для расчета фазовой скорости?
13. Как рассчитать первичные параметры линии, если заданы вторичные?
14. Запишите формулу для расчета длины линии и объясните ее физический смысл?
15. Как связана длина линии с частотой распространяющегося по ней сигнала?
16. Как определить частоту сигнала, при которой в линии уложится целая длина волны распространяющегося по ней сигнала?
17. Как изменить эквивалентную длину искусственной линии с малыми потерями?
18. Что такое коэффициент отражения в длинной линии?
19. Запишите выражение коэффициента отражения по напряжению в конце и в начале линии?
20. В каких пределах меняются значения коэффициентов отражения?
21. Чем отличаются между собой коэффициент отражения по напряжению от коэффициента отражения по току и почему?
22. Какой режим работы линии называется согласованным, в чем его особенность?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 8

Неискаженная передача сигналов в длинной линии. Условие Хевисайда.

Контрольные вопросы:

1. Понятие неискаженной передачи сигналов.
2. Условия неискаженной передачи аналоговых сигналов в длинной линии.
3. Причины появления амплитудно-частотных искажений (АЧИ) аналоговых сигналов.
4. Причины появления фазо-частотных искажений (ФЧИ) аналоговых сигналов.
5. Как влияют АЧИ и ФЧИ на различные виды связи.
6. Требования к коэффициенту ослабления α при неискаженной передаче сигнала.
7. Требования к коэффициенту фазы β при неискаженной передаче сигнала.
8. Условия Хевисайда.
9. Реализация условий Хевисайда в реальных длинных линиях.
10. Назначение амплитудных корректоров.
11. Виды амплитудных корректоров.
12. Амплитудные корректоры 1-го и 2-го порядков.
13. Расчет и подбор параметров амплитудного корректора.
14. Назначение фазовых корректоров.
15. Фазовые корректоры (контуры) 1-го и 2-го порядков.
16. Расчет и подбор параметров фазового корректора

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 9

Дискретные сигналы и их характеристики

Контрольные вопросы:

1. Дайте определение аналогового сигнала. Приведите пример.
2. Дайте определение дискретного сигнала. Приведите пример.
3. Дайте определение цифрового сигнала. Приведите пример.
4. Что такое уровень квантования?
5. Что такое дискретизация сигнала по времени и по уровню?
6. Как производится дискретизация аналогового сигнала?
7. В каком виде записывается дискретный сигнал?
8. Что такое единичный дискретный импульс и его назначение.
9. Запись дискретного сигнала в виде серии смещенных дискретных импульсов.
10. Теорема Котельникова. Ее определение и назначение.
11. Для чего нужен интервал дискретизации по времени Котельникова?
12. Каким будет спектр аналогового сигнала, если интервал дискретизации по времени выбран по величине больше, чем рассчитанный по теореме Котельникова, и почему?
13. Каким будет спектр аналогового сигнала, если интервал дискретизации по времени выбран по величине меньше, чем рассчитанный по теореме Котельникова, и почему?
14. Система цифровой обработки сигналов.
15. Спектр дискретного сигнала.
16. Нарисуйте спектр дискретного сигнала.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 10

Алгоритм цифровой фильтрации. Цифровые фильтры

Контрольные вопросы:

1. Дискретное преобразование Лапласа.
2. Z – преобразование и его использование.
3. Дайте определение цифрового фильтра.
4. Достоинства и недостатки цифровых фильтров.
5. Импульсная характеристика дискретной цепи.
6. Системная функция цифрового фильтра.
7. Алгоритм цифровой фильтрации.
8. Назначение элементов цифрового фильтра.
9. Объясните алгоритм работы цифрового фильтра.
10. Что собой представляет выходной сигнал цифрового фильтра?
11. Нерекурсивный цифровой фильтр.
12. Объясните алгоритм работы нерекурсивного цифрового фильтра.
13. Нарисуйте схему нерекурсивного цифрового фильтра 2-го порядка.
14. Запишите выражение импульсной характеристики и системной функции нерекурсивного цифрового фильтра 2-го порядка.
15. Рекурсивный цифровой фильтр.
16. Объясните алгоритм работы рекурсивного цифрового фильтра.
17. Нарисуйте схему рекурсивного цифрового фильтра 2-го порядка.
18. Запишите выражение передаточной функции рекурсивного цифрового фильтра.
19. Запишите выражение системной функции рекурсивного цифрового фильтра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соболев В.Н. Теория электрических цепей. Учебное пособие. Москва: Горячая линия - Телеком, 2014 <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=465730>
2. Бакалов В.П., Дмитриков В.Ф., Крук Б.И. Основы теории цепей. Учебное пособие. Москва: Горячая линия - Телеком, 2013 <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=411569>
3. Каблукова М.В. Теория электрических цепей: Конспект лекций. – М.: Информсвязьиздат, 2000.
4. Кардашев Г.А. Цифровая электроника на персональном компьютере. – М.: Горячая линия – Телеком, 2003.