ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ВЫСШЕМУ ОБРАЗОВАНИЮ

Чувашский государственный университет имени И.Н.Ульянова

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Методические указания к выполнению
расчетно-графических и курсовых работ
с помощью ЭВМ

Чебоксары 1995

РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА 1

РАСЧЕТ ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ С ПОСТОЯННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ

Цель работы - освоение основных методов расчета линейных электрических цепей с постоянными источниками: законов Кирхгофа, метода контурных токов, узловых потенциалов.

Содержание работы.

1.1. Составление задания. Номер варианта задания для выполнения расчетно-графической работы определяется в соответствии с порядковым номером студента в списке группы или задается преподавателем. На рис. 1.1 приведены варианты графов электрических цепей, по которым формируются их схемы.

Каждая ветвь схемы состоит из резистора и, может быть, последовательно соединенного с ним источника ЭДС. Число последних не должно быть меньше двух и, кроме того, должно соблюдаться еще одно условие: ЭДС включаются в каждую из параллельных ветвей (если такие имеются). В какие из непараллельных ветвей включить ЭДС, студент решает самостоятельно.

Сопротивления резисторов (заданные в кОм) выбираются последовательно из ряда номинальных значений сопротивлений (табл.1.1), начиная со значения указанного преподавателем или из табл.1.2.

Значения ЭДС берутся из табл.1.3 аналогичным образом.

Таблица 1.1

Ряд номинальных значений сопротивлений

R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8	R_9	R_{10}	R_{11}		
1.0	1.1	1.2	1.3	1.5	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.7	3.0	3.3
3.6	3.9	4.3	4.7	5.1	5.6	6.2	6.8	7.5	8.2	9.1	10	11
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		

Таблица 1.2

Начальное сопротивление в ряду номинальных значений

Группа	1	2	3	4
Сопротивление, кОм	5.6	2.7	8.2	3.9

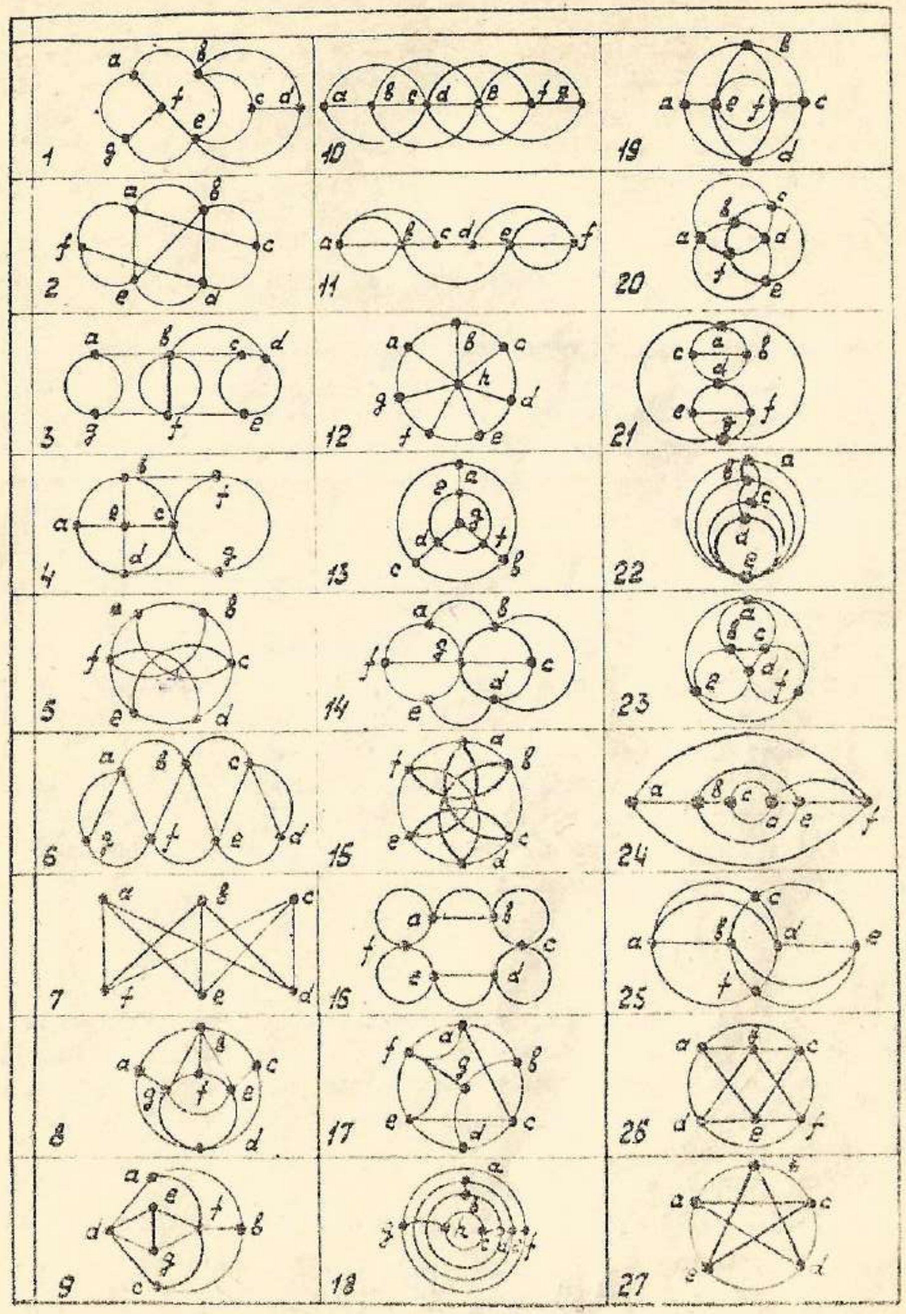


Рис. 1.1.

Таблица 1.3

Значения ЭДС, включаемых в схему

Группа		1	2	3	4
ЭДС	1	30	16	24	5
В	2	36	10	15	3

Кроме того, к двум узлам цепи подключается источник тока, значение которого определяется по формуле $J = E_{max}/R_{min}$, где E_{max} - наибольшая по значению ЭДС, включенных в схему, R_{min} - наименьшее из всех сопротивлений в схеме. К каким двум узлам подключить источник тока, студент решает самостоятельно или использует табл. 1.4.

Составленная схема утверждается преподавателем и прилагается к выполненному расчету.

1.2. Подготовка данных для расчета на ЭВМ

1.2.1. Определить число узлов цепи - k, число ветвей с неизвестными токами - m, число независимых контуров с неизвестными контурными токами - n, число источников тока - l.

1.2.2. Выбрать независимые контуры и принять условно-положительные направления токов в ветвях и контурах, разметить узлы.

1.2.3. Составить для полученной цепи систему уравнений по законам Кирхгофа в матричной форме

$$[A][I] = [B], \qquad (1.1)$$

где $[A]$ - квадратная матрица постоянных коэффициентов размерности $m \times m$, $[I]$ - вектор-столбец искомых токов в ветвях размерности m, $[B]$ - вектор-столбец свободных членов размерности m, составленный комбинацией известных значений источников ЭДС и тока, а также сопротивлений ветвей.

1.2.4. Метод контурных токов.

1.2.4.1. Составить систему уравнений по методу контурных токов

$$[R_K][I_K] = [C_E][E] - [R_J][J], \qquad (1.2)$$

Таблица 1.4

Точки подключения источников тока

№ варианта	Группа 1	2	3	4	№ варианта	Группа 1	2	3	4
1	ad	bg	fc	fd	15	ac	bd	ad	cf
2	ad	bf	be	ce	16	ac	be	ad	cf
3	ad	be	ge	cg	17	ag	bd	ad	be
4	ag	bd	be	ef	18	ag	bh	ah	ce
5	ad	bf	ef	ce	19	ac	bd	af	ce
6	ad	bg	ec	cf	20	ad	be	ae	cf
7	ac	df	ec	ab	21	ad	be	ag	cf
8	ac	bd	gc	eg	22	ad	bc	bd	cd
9	ac	bd	be	df	23	ad	bf	ef	ce
10	ac	bd	cf	eg	24	ac	ad	bf	cf
11	ac	bd	be	af	25	ad	bd	ae	be
12	ad	be	gd	cf	26	ac	df	af	be
13	ag	be	af	cf	27	ac	ad	bd	ce
14	ad	be	ca	cf	28				

где $[R_K]$ - квадратная симметричная матрица контурных сопротивлений размерностью $n \times n$; $[I_K]$ - вектор-столбец неизвестных контурных токов размерности n ; $[C_E]$ - прямоугольная матрица связи источников ЭДС размерности $m \times n$. Строки матрицы $[C_E]$ соответствуют контурам, а столбцы - ветвям с источниками ЭДС. Элементы матрицы $C_{kb} = 0$, если источник ЭДС b - й ветви не включен в k-контур. В противном случае $C_{kb} = 1$ или $C_{kb} = -1$ в зависимости от того, совпадают или не совпадают положительные направления ЭДС и направление обхода контура; $[E]$ - вектор-столбец источников ЭДС ветвей размерности n , все его элементы - положительные числа, соответствующие значениям ЭДС в ветвях или (при их отсутствии) равные нулю; $[R_J]$ - прямоугольная матрица взаимных контурных сопротивлений размерности $n \times l$; $[J]$ - вектор-столбец источников токов (известных контурных токов) размерности l .

1.2.4.2. Составить систему уравнений, описывающую связь между неизвестными токами ветвей и контурными токами

$$[I]=[D][I_p], \qquad (1.3)$$

где $[D]$ - матрица контуров размерности $m \times (n+l)$, строки которой соответствуют ветвям, а столбцы - расширенной матрице контурных токов . Элементы матрицы $d_{b,k+j} = 0$, если b - я ветвь не включена в контур (в том числе и в контур с известным контурным током). Если b - я ветвь включена в $(k+j)$-й контур, то $d_{b,k+j}=1, d_{b,k+j}=-1$ в зависимости от того, совпадают или не совпадают положительные направления токов в ветвях и контурных токов.

1.2.5. Составить систему линейных алгебраических уравнений относительно узловых потенциалов в матричной форме, приняв потенциал одного из узлов (базового) равным нулю ($V_0 = 0$).

$$[G_y][V]=[F][G_b][E]+[H][J], \qquad (1.4)$$

где $[G_y]$ - квадратная матрица узловых проводимостей размерности $(k-1)\times(k-1)$; $[V]$ - вектор-столбец неизвестных узловых потенциалов; $[F]$ - прямоугольная матрица связи источников ЭДС ветвей размерности $(k-1)\times m$. Элементы матрицы могут принимать одно из трех значений: 0 - если источник ЭДС ветви не подключен к рассматриваемому узлу, 1 или (-1) - в противном случае и в зависимости от того, направлен он к узлу или от узла соответственно; $[G_b]$ - диагональная матрица проводимостей ветвей размерности $m \times m$. Элементы матрицы расположены на главной диагонали и равны проводимостям соответствующих ветвей, остальные элементы - нулевые; $[E]$ - вектор-столбец источников ЭДС ветвей размерности m ; $[H]$ - матрица связи источников тока. Элементы матрицы принимают следующие значения: 0 - если источник тока не подключен к рассматриваемому узлу; 1 или (-1) - в противном случае и в зависимости от направления источника тока по отношению к узлу; $[J]$ - вектор-столбец источников тока размерности l.

Замечания. 1.1) Проводимости, вводимые в ЭВМ при расчете по методу узловых потенциалов, должны быть определены с высокой точностью (не менее пяти значащих разрядов). Иначе трудно рассчитывать на хорошее совпадение результатов.

1.2) При наличии в цепи вырожденной ветви (ветви с нулевым сопротивлением) для корректности расчета следует добавить в нее малое сопротивление (например, $R = 10^{-6}$ Ом), которое практически не влияет на токораспределение, но позволяет использовать разработанное программное обеспечение.

1.3) Если в ветви нет источника ЭДС, то необходимо ввести в нее произвольно направленный источник ЭДС, численно равный нулю; и при записи системы (1.4) учитывать этот источник соответствующим коэффициентом матрицы . Такой прием используется для задания топологии цепи.

1.2.6. Для правильно сделанного расчета должен выполняться баланс мощностей: для любой замкнутой электрической цепи сумма мощностей $P_И$, развиваемых источниками электрической энергии, равна сумме мощностей $P_П$, расходуемых в приемниках электрической энергии (пассивных элементах)

$$\sum P_И = \sum P_П ,$$

где $\sum P_И = \sum (E I_E) + \sum (U_J J)$; $\sum P_П = \sum I^2 R$.

При этом токи через источники ЭДС I_E и напряжения U_J на источниках тока определяются расчетным путем.

1.3. Выполнение расчета на ЭВМ

1.3.1. Вызвать необходимые для проведения расчета программы и ввести подготовленные данные. После окончания работы программы зарегистрировать результаты расчета.

1.3.2. Сопоставить результаты расчета тремя методами. Если расчет выполнен правильно, то величины токов должны совпадать с высокой точностью (допустимая погрешность не более 1%). Убедиться, что баланс мощностей сошелся.

ПРИМЕР : Составление по графу рис. 1.2 электрической цепи и ее анализ: по законам Кирхгофа, методу контурных токов и методу узловых потенциалов. Проверка баланса мощностей.

Схема электрической цепи, полученная в соответствии с указаниями п. 1.1, приведена на рис. 1.3.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ:

$m=12$ - число ветвей цепи с неизвестными токами, $n=6$ - число независимых контуров с неизвестными контурными токами, $l=1$ - число источников тока, $k=7$ - число узлов цепи.

Система уравнений по законам Кирхгофа

$$
\left\{
\begin{array}{lll}
I_1 - I_2 - I_{12} = 0 & \text{узел} & a \\
I_2 - I_3 + I_{12} = 0 & & g \\
I_3 - I_4 - I_9 - I_{10} = J & & f \\
I_4 - I_5 + I_8 = -J & & e \\
I_5 - I_6 - I_7 = 0 & & d \\
I_6 - I_8 - I_{11} = 0 & & c \\
\hline
R_2 I_2 - R_{12} I_{12} = 0 & \text{контур} & 1\text{-}1 \\
R_1 I_1 + R_3 I_3 + R_{10} I_{10} + R_{12} I_{12} = E_{10} & & 2\text{-}2 \\
R_9 I_9 - R_{10} I_{10} = E_9 - E_{10} & & 3\text{-}3 \\
R_4 I_4 - R_8 I_8 - R_9 I_9 + R_{11} I_{11} = -E_9 & & 4\text{-}4 \\
R_5 I_5 + R_6 I_6 + R_8 I_8 = 0 & & 5\text{-}5 \\
-R_6 I_6 + R_7 I_7 - R_{11} I_{11} = 0 & & 6\text{-}6
\end{array}
\right.
$$

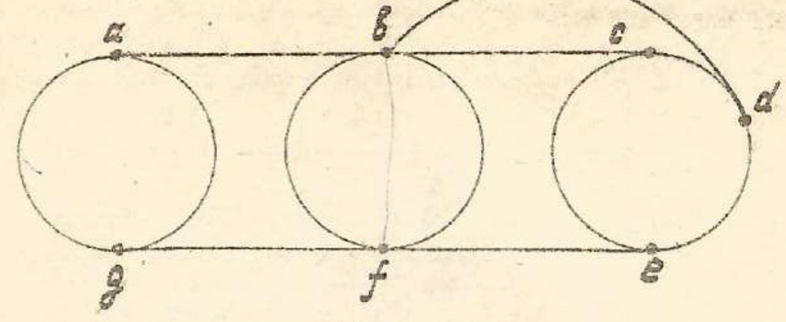


Рис. 1.2.

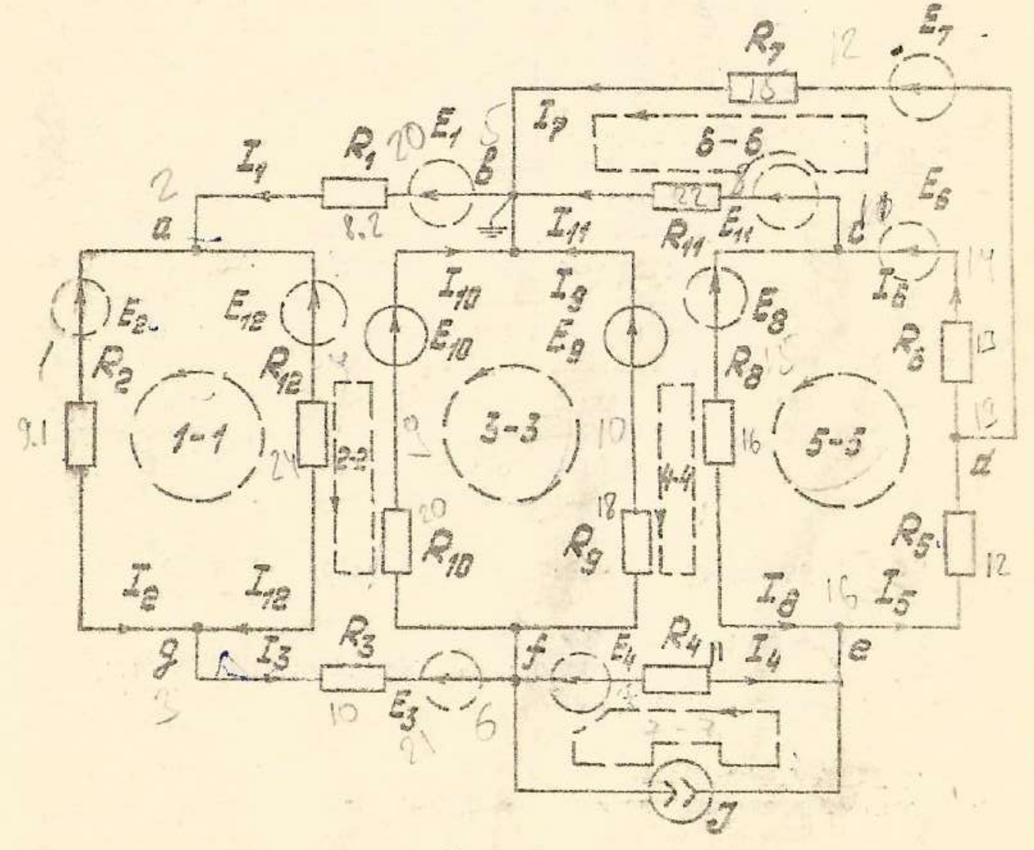


Рис. 1.3.

Система в матричной форме (1.1)

[A] =

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
2	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
3	0	0	1	-1	0	0	0	0	-1	-1	0	0
4	0	0	0	1	-1	0	0	1	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	-1	-1	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	1	0	-1	0	0	-1	0
7	0	9,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-24
8	8,2	0	10	0	0	0	0	0	0	20	0	24
9	0	0	0	0	0	0	0	0	18	-20	0	0
10	0	0	0	11	0	0	0	-16	-18	0	22	0
11	0	0	0	0	0	12	13	0	16	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	-13	15	0	0	-22	0

[B] - [0; 2,927; 0; -2,927; 0; 0; 0; 15; 9; -24; 0; 0]^T

Результаты расчета на ЭВМ

[I] - [1,644; 1,192; -1,283; 0,446; -9,866; 0,456; -0,327; 0,695; 0,175; 0,317; 0,452]^T

<u>Метод контурных токов.</u>

Система уравнений по методу контурных токов

$$\begin{cases} (R_2+R_{12})I_{11} - R_{12}I_{22} = 0; & \text{контур 1-1} \\ -R_{12}I_{11} + (R_1+R_3+R_{10}+R_{12})I_{22} - R_{10}I_{33} - R_3 J = E_{10}; & \text{2-2} \\ -R_{10}I_{22} + (R_3+R_{10})I_{33} - R_9 I_{44} = E_9 - E_{10}; & \text{3-3} \\ -R_9 I_{33} + (R_4+R_8+R_9+R_{11})I_{44} - R_8 I_{55} - R_{11}I_{66} - R_4 J = -E_9; & \text{4-4} \\ -R_8 I_{44} + (R_5+R_6+R_8)I_{55} - R_6 I_{66} = 0; & \text{5-5} \end{cases}$$

В матричной форме (1.2), (1.3)

$[R_K]$ =

	1	2	3	4	5	6
1	33,1	-24	0	0	0	0
2	-24	62,2	-20	0	0	0
3	0		38	-18	0	0
4				67	-16	-22
5					41	-13
6						50

[E] - [0,0,0,0,0,0,0,0,24,15,0,0]^T; [J] - 2,927;

$[C_E]$ =

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

	1	2	3	4	5	6	7
1	0	1	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0
3	0	1	0	0	0	0	-1
4	0	0	0	1	0	0	-1
5	0	0	0	0	1	0	0
6	0	0	0	0	1	-1	0
7	0	0	0	0	0	1	0
8	0	0	0	-1	1	0	0
9	0	0	1	-1	0	0	0
10	0	1	-1	0	0	0	0
11	0	0	0	1	0	-1	0
12	-1	1	0	0	0	0	0

(Above: **[D] =**)

<u>Результаты расчета на ЭВМ</u>

Контурные токи $[I_к]$ - [1,192;1,645;1,468;0,773;0,446;0,456];

Токи ветвей $[I]$ - [1,644;1,192;-1,283;-2,154;0,446;-9,865;
0,456;-0,327;0,695;0,175;0,317;0,459]^T.

<u>Метод узловых потенциалов</u>

Система уравнений по методу узловых потенциалов. Потенциал узла b примем равным нулю ($V_b=0$).

$$
\begin{cases}
V_a\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_{12}}\right)-V_g\left(\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_{12}}\right)=0; & \text{узел } a\\
-V_a\left(\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_{12}}\right)+V_g\left(\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_{12}}+\frac{1}{R_3}\right)-V_f\cdot\frac{1}{R_3}=-J; & g\\
-V_g\frac{1}{R_3}+V_f\left(\frac{1}{R_{10}}+\frac{1}{R_9}+\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_4}\right)-V_e\frac{1}{R_4}=-E_9\frac{1}{R_9}-E_{10}\frac{1}{R_{10}}; & f\\
-V_f\frac{1}{R_4}+V_e\left(\frac{1}{R_4}+\frac{1}{R_8}+\frac{1}{R_5}\right)-V_d\frac{1}{R_5}-V_c\frac{1}{R_8}=J; & e\\
-V_e\frac{1}{R_4}+V_d\left(\frac{1}{R_5}+\frac{1}{R_6}+\frac{1}{R_7}\right)-V_c\frac{1}{R_6}=0; & d\\
-V_e\frac{1}{R_8}-V_d\frac{1}{R_5}+V_c\left(\frac{1}{R_6}+\frac{1}{R_8}+\frac{1}{R_{11}}\right)=0; & c
\end{cases}
$$

Представим систему в матричной форме (1.4)

$[G_y] =$

1	2	3	4	5	6	
0,27431	-0,15684	0	0	0	0	a
-0,15617	0,25243	-0,1	0	0	0	g
0	- 0.1	0,29606	-0,09128	0	0	f
0	0	-0,09134	0,23711	-0,08333	-0,06314	e
0	0	0	-0,09143	0,22702	-0,07711	d
0	0	0	-0,06305	-0,08323	0,18541	c

[F] =

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	a
2	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	g
3	0	0	-1	1	0	0	0	0	-1	-1	0	0	f
4	0	0	0	-1	-1	0	0	-1	0	0	0	0	e
5	0	0	0	0	1	-1	-1	0	0	0	0	0	d
6	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	-1	0	c

Примечание: Матрица сформирована с учетом замечания 1.3 (рис. 1.3)

$[H]$ - $[0;-1;0;1;0;0]^T$; $[J]$ - $[2,97]$;

$[G_в]$ -diag(0,12201;0,11032;0,10021;0,09107;0,08334;0,07705;0,06613;
0,06332;0,05622;0,05017;0,04512;0,04241)

$[E]$ - $[0;0;0;;0;0;0;0;0;24;15;0;0]^T$;

Результаты расчета на ЭВМ

Узловые потенциалы: $[V]$ -[-13,478;-24,323;11,490;12,200;6,848;6,972]

Токи ветвей: $[I]$ -[1,644;1,192;-1,283;0,446;-9,866;0,456;-0,327;
0,695;0,175;0,317;0,452]^T.

Баланс мощностей: $P_и$ -128,208 Вт; $P_п$ -128,207 Вт,
т.е. $P_и \approx P_п$.

Примечание: В методе узловых потенциалов программа выводит абсолютные значения токов в ветвях цепи и их направления.

РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА 2

РАСЧЕТ ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ С СИНУСОИДАЛЬНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ

Цель работы - освоение комплексного метода расчета цепи синусоидального тока; составление комплексных уравнений и их решения с помощью ЭВМ.

Содержание работы.

2. Подготовка к выполнению работы.

2.1. Составление задания.

Граф электрической цепи - тот же, что и в первой работе. Но теперь в схему вводятся источники синусоидального напряжения и тока частоты $f = 50 Гц$ $(\omega = 100\pi\ c^{-1})$. Всего используется два источника - ЭДС и источник тока. Действующие значения E и начальные фазы ЭДС ψ_E указаны в табл. 2.1. Действующее значение источника тока определяется как $J = E/Z_{min}$, где Z_{min} - минимальное из полных сопротивлений ветвей. Начальные фазы источников тока приведены в табл. 2.2.

Вводить дополнительные источники в параллельные ветви, как это делалось в первой работе, в настоящем задании не требуется.

Ветви включают в себя следующие элементы: сопротивления R, индуктивности L и емкости C. В каждую ~~ветвь~~ схему вводится одна ветвь RL (последовательное соединение R и L) и одна RC (последовательное соединение R и C), все остальные ветви содержат только чистые R, только L и только C элементы. Число ветвей рода L и рода C оговорено в табл. 2.3, рода R - все оставшиеся ветви.

Таблица 2.1

Параметры ЭДС

Группа	1	2	3	4
E, В	220	380	36	24
ψ_E, град	90	120	150	-30

Таблица 2.2

Параметр источника тока

Группа	1	2	3	4
ψ_i, град	180	30	-120	60

Таблица 2.3

Число ветвей с элементами R или L или C

Группа	1	2	3	4
Только L	7	6	4	5
Только C	1	2	4	3

Таблица 2.4

Начальное значение в ряду сопротивлений

Группа	1	2	3	4
R, кОм	1.6	3.0	12	18

Таблица 2.5

Набор индуктивностей и емкостей для каждой группы

Группа	1	2	3	4
L, Гн	2.0; 2.2; 2.4 2.6; 2.8; 3.0 3.2; 3.5;	8.0; 8.2; 8.4 8.6; 8.8; 9.0 9.2; 9.5	30; 31 32; 33 34	42; 43 44; 45 46;
C, мкФ	4.7; 5.6	0.68; 0.82 1.0	0.22; 0.27 0.33; 0.39	0.18; 0.22 0.27; 0.33 0.47

Параметры резисторов R выбираются из ряда номинальных значений из табл. 1.1. Из этого ряда берутся последовательно идущие друг за другом значения, начиная с того, которое указано в табл. 2.4.

Величины емкостей и индуктивностей, используемые при построении схемы, даны в табл. 2.5.

Замечание: если число значений емкостей или индуктивностей, приведенных в табл. 2.5, недостаточно, то некоторые значения можно использовать повторно.

2.2. Методические указания для составления матричных уравнений по законам Кирхгофа, методу контурных токов и методу узловых потенциалов аналогичны пунктам 1.2 работы 1 с учетом комплексного характера систем уравнений.

ПРИМЕР: Подготовить данные для расчета на ЭВМ токов ветвей электрической цепи синусоидального тока (рис. 2.1) по законам Кирхгофа, методом контурных токов и методом узловых потенциалов.

Дано: $\dot{J} = 0{,}89$; $R_1 = 20$ кОм; $R_5 = 70$ кОм; $R_6 = 30$ кОм;
$x_{c3} = 1/\omega C_3 = 120$ кОм; $x_{L4} = \omega L_4 = 100$ кОм; $x_{c2} = 1/\omega C_2 = 50$ кОм;
$\dot{E}_1 = j120$ В; $\dot{E}_3 = -j100$ В; $\dot{E}_5 = (1-j)\,100$ В.

Подготовка к расчету на ЭВМ

Система уравнений по законам Кирхгофа

$$\begin{cases} -\dot{I}_1 - \dot{I}_3 - \dot{I}_4 = \dot{J}; & \text{узел a} \\ -\dot{I}_1 - \dot{I}_2 - \dot{I}_6 = 0; & \text{в} \\ \dot{I}_3 - \dot{I}_5 + \dot{I}_6 = 0; & \text{с} \\ R_1\dot{I}_1 + (R_6 + jx_{L6})\dot{I}_6 - jx_{L4}\dot{I}_4 = \dot{E}_1; & \text{контур 1-1} \\ -(R_6 + jx_{L6}) - jx_{c2}\dot{I}_2 - R_5\dot{I}_5 = \dot{E}_5; & \text{2-2} \\ jx_{L4}\dot{I}_4 + R_5\dot{I}_5 + jx_{c3}\dot{I}_3 = -\dot{E}_3. & \text{3-3} \end{cases}$$

Подставив числовые значения, запишем ее в матричной форме типа (1.1)

$$[\underline{A}][\dot{I}] = [\dot{B}],$$

$\dot{E}_5 = 141{,}421 \angle 45$

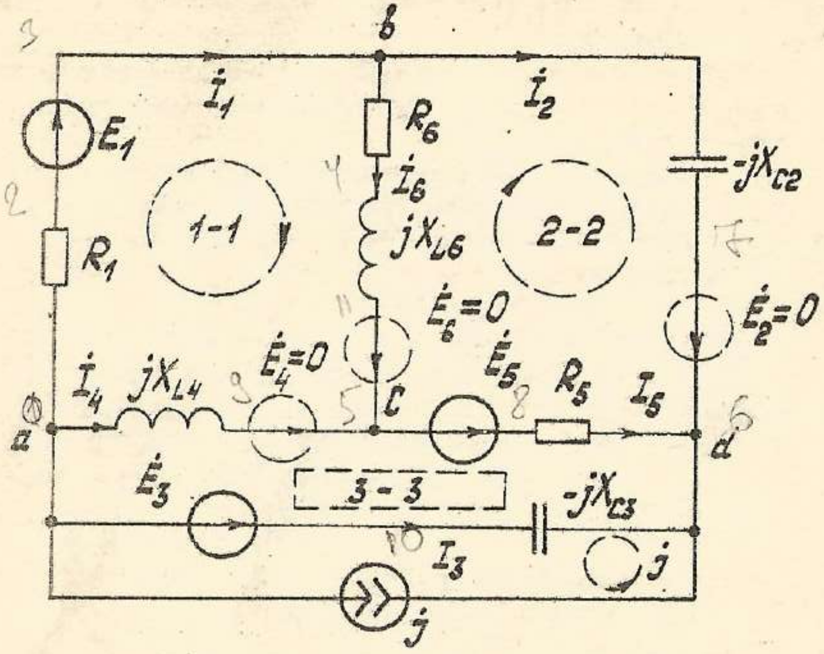


Рис. 2.1.

$$[\underline{A}] = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline -1+j0 & 0+j0 & -1+j0 & -1+j0 & 0+j0 & 0+j0 \\ \hline 1+j0 & -1+j0 & 0+j0 & 0+j0 & 0+j0 & -1+j0 \\ \hline 0+j0 & 0+j0 & 1+j0 & 0+j0 & 0+j0 & 1+j0 \\ \hline 20+j0 & 0+j0 & 0+j0 & 0-j100 & 0+j0 & -30-j50 \\ \hline 0+j0 & 0-j50 & 0+j0 & 0+j0 & -70+j0 & 30+j50 \\ \hline 0+j0 & 0+j0 & 0+j120 & 0+j100 & 70+j0 & 0+j0 \\ \hline \end{array}$$

$[\dot{B}]$ = [(89;0); (0;0); (0;0); (0;120); (-100;100); (0;100)]^T =

$$= [\dot{J};0;0;\dot{E}_1;-\dot{E}_5;-\dot{E}_3]^T;\ [\dot{I}] = [\dot{I}_1;\dot{I}_2;\dot{I}_3;\dot{I}_4;\dot{I}_5;\dot{I}_6]^T.$$

Система уравнений по методу контурных токов

$$\begin{cases} (R_1+R_6+jx_{L4}+jx_{L6})\dot{I}_{11}+(-R_6-jx_{L6})\dot{I}_{22}+(-jx_{L4})\dot{I}_{33}=1\cdot\dot{E}_1+0\dot{E}_3+0\dot{E}_5-0\cdot\dot{J}; & 1\text{-}1 \\ (-R_6-jx_{L4})\dot{I}_{11}+(R_6+R_5+jx_{L4}-jx_{C2})\dot{I}_{22}+(-R_5)\dot{I}_{33}=0\cdot\dot{E}_1+0\dot{E}_3+(-1)\dot{E}_5-0\cdot\dot{J}; & 2\text{-}2 \\ (-jx_{L4})\dot{I}_{11}+(-R_5)\dot{I}_{22}+(R_5+jx_{L4}-jx_{C3})\dot{I}_{33}=0\cdot\dot{E}_1+(-1)\dot{E}_3-(-j)\dot{E}_5-(-j120)\dot{J}; & 3\text{-}3 \end{cases}$$

Подставляем в систему числовые значения:

$$\begin{cases} (50+j50)\dot{I}_{11}+(-30-j100)\dot{I}_{22}+(-j50)\dot{I}_{33}=1\cdot\dot{E}_1+0\cdot\dot{E}_3+0\cdot\dot{E}_5-0\cdot\dot{J}; \\ (-30-j100)\dot{I}_{11}+(100+j50)\dot{I}_{22}+(-70)\dot{I}_{33}=0\cdot\dot{E}_1+(-1)\dot{E}_3+0\cdot\dot{E}_5-0\cdot\dot{J}; \\ (-j50)\dot{I}_{11}+(-70)\dot{I}_{22}+(70-j70)\dot{I}_{33}=0\cdot\dot{E}_1+(-1)\dot{E}_3+1\cdot\dot{E}_5-(-j120)\dot{J}; \end{cases}$$

и запишем ее в матричной форме типа (1.2)

$$[\underline{Z}_K][\dot{I}_K] = [C_E][\dot{E}_B] - [\underline{Z}_y][\dot{J}]$$

$[\dot{J}]$ = [0,89exp(j0°)];

$[\dot{I}_K] = [\dot{I}_{11};\dot{I}_{22};\dot{I}_{33}]$;

$$[Z_K]=\begin{array}{c}1\\2\\3\end{array}\begin{bmatrix} 50+j150 & -30-j100 & -j50 \\ -30-j100 & 100+j50 & 70 \\ -j50 & -70 & 70-j70 \end{bmatrix};\qquad [\dot E_B]=\begin{array}{c}1\\2\\3\\4\\5\\6\end{array}\begin{bmatrix} 200\exp(j90^\circ) \\ 0\exp(j0^\circ) \\ 100\exp(-j90^\circ) \\ 0\exp(j0^\circ) \\ 141{,}421\exp(-j45^\circ) \\ 0\exp(j0^\circ) \end{bmatrix}$$

$$[C_E]=\begin{array}{c|cccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ \hline 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \end{array};\quad [Z_J]=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -j120 \end{bmatrix};$$

В матрице отсутствуют элементы 2, 4 и 6 столбцов, так как во 2, 4 и 6-й ветвях отсутствуют источники ЭДС.

Составляем систему уравнений, описывающую связь между неизвестными токами ветвей и контурными токами. Предварительно выбираем положительные направления токов ветвей, как показано на рис. 3.

$$\begin{cases} \dot I_1 = 1\cdot\dot I_{11} + 0\cdot\dot I_{22} + 0\cdot\dot I_{33} + 0\dot J; \\ \dot I_2 = 0\cdot\dot I_{11} + 1\cdot\dot I_{22} + 0\dot I_{33} + 0\dot J; \\ \dot I_3 = 0\cdot\dot I_{11} + 0\cdot\dot I_{22} + (-1)\dot I_{33} + (-1)\dot J; \\ \dot I_4 = (-1)\dot I_{11} + 0\cdot\dot I_{22} + 1\dot I_{33} + 0\cdot\dot J; \\ \dot I_5 = 0\dot I_{11} + (-1)\dot I_{22} + 1\dot I_{33} + 0\cdot\dot J; \\ \dot I_6 = 1\cdot\dot I_{11} + (-1)\dot I_{22} + 0\dot I_{33} + 0\cdot\dot J. \end{cases}$$

Записываем систему в матричной форме

$$[\dot I_B]=\begin{bmatrix} \dot I_1 \\ \dot I_2 \\ \dot I_3 \\ \dot I_4 \\ \dot I_5 \\ \dot I_6 \end{bmatrix};\quad [B]=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix};\qquad [I_K]=\begin{bmatrix} \dot I_{11} \\ \dot I_{22} \\ \dot I_{33} \\ \dot J \end{bmatrix}.$$

Составим систему уравнений по методу узловых потенциалов, приняв предварительно потенциал узла равным нулю ($\dot V_d=0$).

узел a $\quad \dot V_a\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{jx_{L4}}+\frac{1}{-jx_{C3}}\right)-\dot V_b\frac{1}{R_1}-\dot V_c\frac{1}{jx_{L4}}=-\frac{\dot E_1}{R_1}-\frac{\dot E_3}{(-jx_{C3})}-\dot J;$

узел в $\quad -\dot V_a\frac{1}{R_1}+\dot V_b\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{(R_6+jx_{L6})}+\frac{1}{-jx_{C2}}\right)-\dot V_c\frac{1}{(R_6+jx_{L6})}=\frac{\dot E_1}{R_1};$

узел с $\quad -\dot V_a\frac{1}{jx_{L4}}-\dot V_b\frac{1}{(R_6+jx_{L6})}+\dot V_c\left(\frac{1}{jx_{L4}}+\frac{1}{(R_6+jx_{L6})}+\frac{1}{R_5}\right)=\frac{\dot E_5}{R_5}.$

Подставим в эту систему числовые выражения, учтя дополнительные (нулевые) ЭДС в ветвях в соответствии с замечанием (1.3)

$$\dot E_2=\dot E_4=\dot E_6=0;$$

$$\begin{cases} \dot V_a(0{,}05+j0{,}0167)-\dot V_b\cdot 0{,}05-\dot V_c\cdot 0{,}01=(-1)\dot E_1\cdot 0{,}05+(-1)\dot E_3(j0{,}00833)+ \\ \qquad +(-1)\dot E_4(j\cdot 0{,}01)+(-1)\cdot\dot J; \\ -\dot V_a\cdot 0{,}05+\dot V_b(0{,}05882+j0{,}00529)-\dot V_c(0{,}00882-j0{,}01471)=1\cdot\dot E_1\cdot 0{,}05+ \\ \qquad +(-1)\dot E_6(0{,}00882-j0{,}01471)+(-1)\dot E_2\cdot 0{,}02+0\cdot\dot J; \\ -\dot V_a\cdot(-0{,}01)-\dot V_b(0{,}00882-j0{,}01471)+\dot V_c(0{,}02311-j0{,}02471)= \\ \quad =1\cdot\dot E_4(-j0{,}01)+1\cdot\dot E_6(0{,}00822-j0{,}01471)+(-1)\dot E_5(0{,}01429+j0)+0\dot J; \end{cases}$$

Перейдем к матричной форме типа (1.4)

$$[\underline{Y}_y][\dot{V}] = [C][\underline{Y}_в][\dot{E}_в] + [D][\dot{J}],$$

$$[\underline{Y}_y] = \begin{array}{|c|c|c|l} \hline 0,05+j0,00167 & -0,05+j0 & -0,01+j0 & a \\ \hline -0,05+j0 & 0,05882+j0,00529 & -0,00882+j0,01471 & в \\ \hline 0,01+j0 & -0,00882+j0,01471 & 0,02311-j0,02471 & c \\ \hline \end{array};$$

$$[\dot{V}] = [\dot{V}_a; \dot{V}_в; \dot{V}_c]^T; \quad [\underline{Y}_в] = diag[1/R_1; 1/(-jx_{c2}); 1/(-jx_{c3});$$

$$1/jx_{L4}; 1/R_5; 1/(R_6 + jx_{L6})] = [(0,05+j0); (0+j0,02); (0+j0,00833); (0-j0,01); (0,01429+j0); (0,00882-j0,01471)];$$

$$[C] = \begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{array} \\ \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline -1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ \hline 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 \\ \hline \end{array} \end{array}; \quad [\dot{E}_в] = \begin{array}{|r|} \hline 120\exp(j90^0) \\ \hline 0 \\ \hline 100\exp(-j90^0) \\ \hline 0 \\ \hline 100\ 2\exp(-45^0) \\ \hline 0 \\ \hline \end{array};$$

$$[D] = \begin{array}{|c|c|c|} \hline -1 & 0 & 0 \\ \hline \end{array};$$

$$[\dot{J}] = [(0,89+j0)];$$

РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА N3

ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Цель расчета: выполнение на ЭВМ (по готовой программе) расчета сложной электрической цепи, освоение матричного метода узловых напряжений, опытная проверка принципа взаимности.

Содержание работы.

3.1. Повторение расчета схемы, составленной в соответствии с заданием в расчетно-графической работе 1.

3.2. Повторение расчета схемы, составленной в соответствии с заданием в расчетно-графической работе 2.

3.3. Проверка принципа взаимности.

3.3.1. Определение тока, созданного в m-й ветви источником (ЭДС), действующим в n-й ветви. Определение тока n-й ветви, созданного тем же источником, действующим в m-й ветви. Сравнение результатов.

3.3.2. Определение напряжения между точками $\alpha\beta$, созданного источником тока, приложенным к точкам $\gamma\delta$. Определение напряжения между точками $\gamma\delta$, созданного тем же источником тока, приложенным к точкам $\alpha\beta$. Сравнение результатов.

Номера m-й и n-й ветвей приведены в табл. 3.1, а номера точек (узлов) α, β и γ, δ - в табл. 3.2.

Замечания. 3.1. Входные данные компонуются в виде следующих матриц: матрицы соединений, диагональной матрицы сопротивлений, векторов (матриц-столбцов) ЭДС и источников тока.

3.2. Источники тока должны быть введены в состав обобщенных ветвей.

3.3. Выходные данные программы расчета - токи ветвей и обобщенные напряжения ветвей.

3.4. Схемы электрических цепей составляются, как и в работах 1 и 2, т.е. на основании графов, приведенных на рис. 1.1.

Таблица 3.1

Ветви и схемы, по отношению к которым проверяется свойство взаимности.

№ варианта	Группа 1	Группа 2	Группа 3	Группа 4
1	ab; eg	bd; fe	fg; cd	af; ed
2	ab; ef	cd; fa	be; fd	ac; bd
3	ag; bd	bc; fe	cd; gf	bf; ce
4	cf; ae	dc; fg	cb; ad	ec; bf
5	ab; cd	bc; fe	fd; ec	fb; ac
6	gf; ab	fe; bc	cd; af	ed; fb
7	af; be	bf; ec	bd; fc	cd; ae
8	ag; bf	bc; ed	fg; ec	dg; fe
9	dc; gf	ef; bc	ab; eg	da; cb
10	ac; fg	bc; de	ef; ab	eg; df
11	ab; ef	bc; fe	de; ac	df; be
12	ah; gf	gh; fe	bc; hd	eh; cd
13	ae; df	gf; ba	dg; cb	fg; ed
14	fa; gc	ag; bd	bd; ef	dg; ab
15	fb; ed	dc; ab	bc; ef	fa; ec
16	ab; fe	ed; bc	dc; af	ef; dc
17	fg; ab	ec; gb	fa; dc	ac; ef
18	hg; ae	ef; bd	cd; ea	ab; fg
19	ab; ef	fc; da	bc; ae	de; fb
20	af; ec	fe; bd	dc; ab	ae; df
21	ag; cb	bd; ef	ed; fg	gf; ba
22	ae; bd	be; ca	ec; db	de; ba
23	ef; dc	bd; ae	bc; af	ed; cf
24	af; bc	be; ab	cd; ef	df; eb
25	ab; fe	ac; de	fd; ce	be; ad
26	ae; cf	bf; ad	df; ec	bd; ac
27	ab; ce	ac; ed	cd; eb	ad; bc

Таблица 3.2

Пары узлов схемы α ; β ; γ ; δ, по отношению к которым проверяется свойство взаимности.

№ варианта	Группа 1	Группа 2	Группа 3	Группа 4
1	ac; ed	bf; gc	fb; ae	be; df
2	ad; ec	bf; ec	ec; bf	ad; cf
3	ac; ge	df; bg	ae; db	gc; bd
4	ac; df	bg; fa	ef; db	ag; fe
5	fc; eb	bd; ae	ad; eb	bd; fc
6	gb; df	ad; eg	gc; bg	cf; ae
7	ab; fe	bc; ed	df; ca	ac; fd
8	ae; bd	cg; fa	eg; ca	cf; da
9	df; bc	ac; gb	eb; ag	ab; ce
10	ac; be	bd; eg	fd; be	gb; ec
11	ad; ce	df; ec	bd; cf	fa; be
12	ad; gc	fb; ce	eb; gd	fd; ae
13	cg; db	ag; ef	gb; ec	ad; be
14	fb; ad	ec; fd	eb; ac	ea; gd
15	fc; ea	da; eb	fd; ac	ad; fc
16	ae; bd	be; cf	ad; ec	ce; bf
17	ad; gc	eb; cf	ae; bf	ag; be
18	gc; hd	fh; ga	be; hd	eh; af
19	af; ce	db; ca	ba; fa	ec; bd
20	cf; ad	ae; fc	eb; ca	ca; eb
21	ae; bf	bg; fc	ad; be	cf; gb
22	ad; ce	da; be	ad; de	ad; ae
23	ce; bf	ad; ec	bf; ad	ae; bf
24	ac; bd	ce; df	bf; ae	cf; ae
25	ad; fc	be; cf	ea; cf	fc; be
26	af; be	cd; af	be; cd	ac; dc
27	ac; db	be; ad	ec; bd	ae; cd

РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА 4

УСТАНОВИВШИЕСЯ РЕЖИМЫ ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ

Данная работа может быть предложена взамен работ 1 и 2 или 3.

Цель расчета: ознакомление с методами расчета электрических цепей (метод контурных токов и метод узловых напряжений), со схемами соединения четырехполюсников, с теоремой об активном двухполюснике (понятие об эквивалентном генераторе) и с методом эквивалентного генератора.

Содержание работы.

4.1. Составление схемы, состоящей из трех четырехполюсников, соединенных заданным образом, и представляющей собой результирующий четырехполюсник.

На рис. 4.1 приведено 25 схем четырехполюсников. Номер схемы соответствует номеру фамилии в списке группы (по учебному журналу). Параметры четырехполюсников указаны в табл. 4.1.

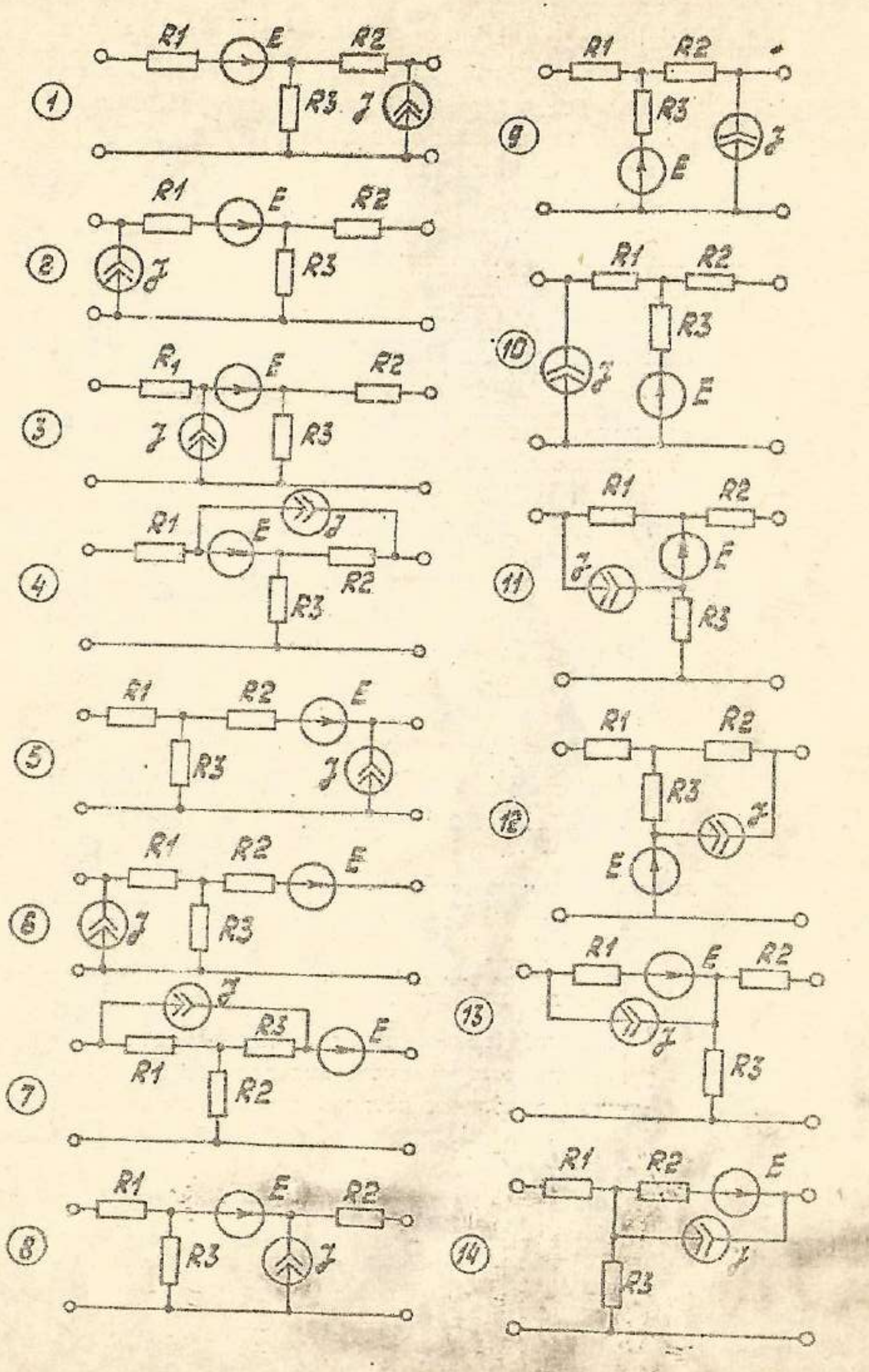
Результирующий четырехполюсник составляется из трех одинаковых элементарных четырехполюсников. Сначала соединяются первый и второй элементарные четырехполюсники. Вид их соединения указан в табл. 4.2. Получается промежуточный четырехполюсник. К нему затем присоединяется третий четырехполюсник. Вид этого соединения задан в табл. 4.3.

Методические указания.

а) Существуют следующие виды соединения четырехполюсников:
A - каскадное (к выходу одного подключается вход другого),
Z - последовательное (входы двух четырехполюсников соединены последовательно между собой, выходы - между собой), *Y* - параллельное (входы соединены параллельно между собой, выходы - между собой), *H* - последовательно-параллельное (входы соединены последовательно, выходы - параллельно), *G* - параллельно-последовательное (входы соединены параллельно, выходы - последовательно).

б) Для определения входного сопротивления сложной электрической цепи можно воспользоваться одним из методов их расчета, подав на вход цепи известное напряжение и определив ток или поступив наоборот (подав ток и определив напряжение).

4.2. Определение тока короткого замыкания результирующего четырехполюсника.



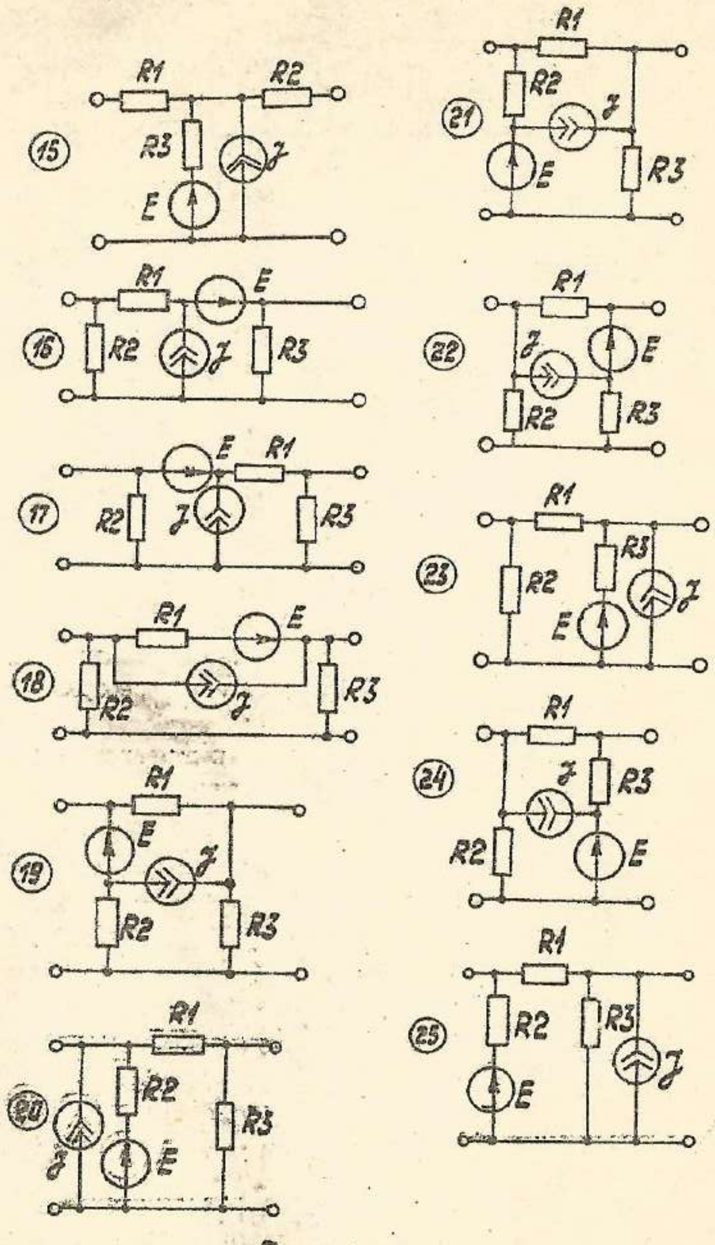


Рис. 4.1.

Таблица 4.Iа

Цепь постоянного тока

Группа	I	2	3	4
R_1, кОм	I,I	I,0	0,82	2,4
R_2, кОм	I,6	I,2	0,9I	2,2
R_3, кОм	3,3	3,9	2,0	6,2
E, В	24	I5	5	36
J, мА	45	I8	7	25

Таблица 4.I.б

Цепь переменного тока

Группа	3I	32	33	4I
Ветвь I	$X_L = 1{,}1$	$X_C = 1{,}0$	$R = 0{,}82$	$X_L = 2{,}4$
Ветвь 2	$X_C = 1{,}6$	$R = 1{,}2$	$X_L = 0{,}91$	$X_C = 2{,}2$
Ветвь 3	$R = 3{,}3$	$X_L = 3{,}9$	$X_C = 2{,}0$	$R = 6{,}2$
$\dot{E}$, В	$24\angle 30^\circ$	$15\angle 90^\circ$	$5\angle 120^\circ$	$36\angle 60^\circ$
$\dot{J}$, мА	$45\angle 90^\circ$	$18\angle -45^\circ$	$7\angle -180^\circ$	$25\angle -30^\circ$

Таблица 4.2

Схема соединения двух четырехполюсников, дающая промежуточный четырехполюсник

№ схемы	Группа 1	Группа 2	Группа 3	Группа 4
I	A	Z	G	H
2	Z	Y	H	A
3	Y	G	A	Z
4	G	H	Z	Y
5	H	A	Y	G
6	A	Z	G	H
7	Z	Y	H	A
8	Y	G	A	Z
9	G	H	Z	Y
I0	H	A	Y	G
II	A	Z	G	H
I2	Z	Y	H	A
I3	Y	G	A	Z
I4	G	H	Z	Y
I5	H	A	Y	G
I6	A	Z	G	H
I7	Z	Y	H	A
I8	Y	G	A	Z
I9	G	H	Z	Y
20	H	A	Y	G
2I	A	Z	G	H
22	Z	Y	H	A
23	Y	G	A	Z
24	G	H	Z	Y
25	H	A	Y	G

Таблица 4.3

Схема соединения промежуточного и оставшегося (третьего) четырехполюсника

№ схемы	Группа 1	Группа 2	Группа 3	Группа 4
I	H	G	Z	A
2	A	H	Y	Z
3	Z	A	G	Y
4	Y	Z	H	G
5	G	Y	A	H
6	H	G	Z	A
7	A	H	Y	Z
8	Z	A	G	Y
9	Y	Z	H	G
I0	G	Y	A	H
II	H	G	Z	A
I2	A	H	Y	Z
I3	Z	A	G	Y
I4	Y	Z	H	G
I5	G	Y	A	H
I6	H	G	Z	A
I7	A	H	Y	Z
I8	Z	A	G	Y
I9	Y	Z	H	G
20	G	Y	A	H
2I	H	G	Z	A
22	A	H	Y	Z
23	Z	A	G	Y
24	Y	Z	H	G
25	A	Y	A	H

4.3. Определение напряжения холостого хода результирующего четырехполюсника.

4.4. Определение внутреннего сопротивления результирующего четырехполюсника.

4.5. Составление схемы генератора, эквивалентного результирующему четырехполюснику; определение максимальной мощности, отдаваемой им в нагрузку.

4.6. Требования к расчету.

4.6.1. При определении тока короткого замыкания и напряжения холостого хода рекомендуется воспользоваться ЭВМ. Одну из величин определить по методу контурных токов, другую - узловых напряжений. Внутреннее сопротивление можно определить вручную либо на ЭВМ.

4.6.2. По результатам расчета необходимо сделать проверку

$$R_{в} = U_{xx} / I_{кз}$$

на постоянном токе или

$$\underline{Z}_{в} = \dot{U}_{xx} / \dot{I}_{кз}$$

на переменном, где $R_{в}$ - активное внутреннее сопротивление; U_{xx}, $I_{кз}$ - постоянное напряжение холостого хода и ток короткого замыкания; $\underline{Z}_{в}$ - комплексное внутреннее сопротивление; $\dot{U}_{xx}$, $\dot{I}_{кз}$ - комплексы напряжения холостого хода и тока короткого замыкания.

РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА 5

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Цель работы: освоение методов расчета переходных процессов на примере цепи третьего порядка. Исследуется процесс прохождения прямоугольного импульса напряжения через линейный четырехполюсник тремя методами: классическим, операторным, переменных состояния.

Содержание работы.

5.1. Задание. Схемы четырехполюсников с нагрузочным резистором приведены на рис. 5.1. Импульс напряжения подается на вход четырехполюсника. Искомая величина - выходное напряжение.

Параметры элементов четырехполюсников во всех вариантах заданий принимаются одинаковыми

$$L_1 = 1\,Гн, \quad L_2 = 2\,Гн,$$
$$C_1 = 1\,мкФ, \quad C_2 = 2\,мкФ.$$

Внутреннее сопротивление источника R_1 (оно введено в состав четырехполюсника) и сопротивление нагрузки R_2 для разных академических групп даны в табл. 5.1. Длительность импульса $T_и = 2\,мс$, уровень импульса $U_и = 5\,В$.

Таблица 5.1

Группа	1	2	3	4	
R_1, кОм	1.1	[illegible]	3	0.5	4
R_2, кОм	1.2	[illegible]	1.5	0.8	8

Примечание. Переходный процесс в исследуемой цепи состоит из двух стадий. Начальные независимые условия на первой стадии переходного процесса - нулевые, т.к. четырехполюсник до подачи импульса был обесточен. Чтобы определить независимые начальные условия для второй стадии процесса, необходимо определить значения переменных состояния (токов в индуктивностях, напряжений на емкостях) в момент прохождения заднего фронта импульса. В таком случае потребуется два вызова программы расчета переходного процесса на ЭВМ. Поэтому здесь более удобно применение метода наложения. Он основан на представлении исходного импульса как суммы двух ступенчатых воздействий, причем

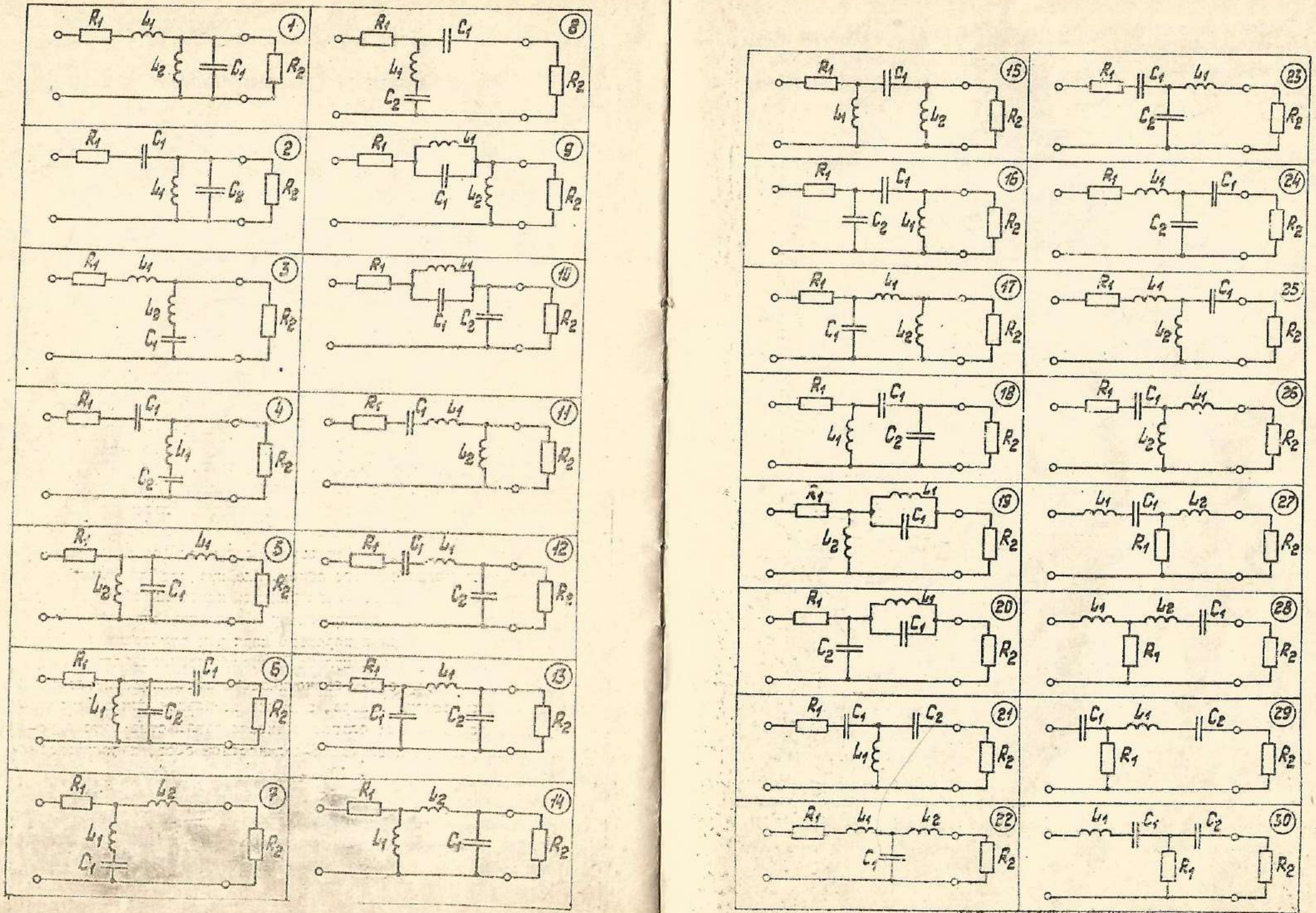


Рис. 5.1.

второе ступенчатое воздействие симметрично первому воздействию относительно оси времени и смещено на $T_и$ (рис. 5.2). Поэтому реакция от второго воздействия на линейный четырехполюсник определяется как

$$u_{вых,2}(t) \equiv 0, \quad t < T_и,$$
$$u_{вых,2}(t) = -u_{вых,1}(t-T_и), \quad t > T_и,$$

где $u_{вых,1}$ - выходная реакция четырехполюсника на первое ступенчатое воздействие. При этом

$$u_{вых}(t) = u_{вых,1}(t) + u_{вых,2}(t).$$

5.2. Подготовка данных для расчета на ЭВМ

Классический метод.

5.2.1. Определить установившееся значение искомого напряжения первой стадии переходного процесса на постоянном токе $U_{вых\,1,уст} = U_{вых,уст}$.

5.2.2. Составить характеристическое уравнение цепи в виде

$$ap^3 + bp^2 + cp + d = 0$$

любым известным методом (входного сопротивления, методом главного определителя или другим).

5.2.3. Определить зависимые начальные условия $u_{вых}(0_+)$,

$$\left.\frac{du_{вых}}{dt}\right|_{t=0_+}; \quad \left.\frac{d^2u_{вых}}{dt^2}\right|_{t=0_+}.$$

Для этого используется система уравнений цепи, записанная по законам Кирхгофа для мгновенных значений. Кроме того, необходимо учесть, что начальные независимые условия были нулевыми.

Операторный метод.

5.2.4. Принять установившееся значение искомой величины и начальные независимые условия согласно п.п. 5.2.1, 5.2.3 классического метода.

5.2.5. Рассчитать значения переменных состояния в установившемся режиме от действия первого ступенчатого воздействия

5.2.6. Определить начальные независимые условия для свободного режима переходного процесса

$$i_{Lсв}(0_+) = i_L(0_+) - i_{Lуст};$$
$$u_{Cсв}(0_+) = u_C(0_+) - u_{Cуст}.$$

5.2.7. Составить операторную схему замещения четырехполюсника для свободного режима и определить изображение искомой свободной составляющей напряжения в следующей канонической форме

$$F_{св}(p) = \frac{a_2p^2 + a_1p + a_0}{b_3p^3 + b_2p^2 + b_1p + b_0},$$

где a_i, b_j - постоянные коэффициенты.

Метод переменных состояния.

5.2.8. Составить систему уравнений относительно переменных состояния в матричном виде

$$[\dot{X}] = [L][X] + [M][E_J], \tag{5.1}$$

где $[X]$, $[\dot{X}]$ - вектор-столбцы переменных состояния и их производных размерности $j = 3$ (число переменных состояния); $[L]$ - квадратная матрица 3-го порядка; $[M]$ - прямоугольная матрица размерности $j \times q$, где q - общее число источников ЭДС и тока (в данном случае $q = 1$). $[E_J]$ - вектор-столбец напряжений источников ЭДС и токов источников тока. Элементы матриц $[L]$ и $[M]$ определяются только параметрами четырехполюсника и его топологией.

Примечание: 1). При составлении системы (5.1) можно воспользоваться системой уравнений четырехполюсника, составленной по законам Кирхгофа по п. 5.2.3 классического метода или методом наложения.

2) Вектор-столбец переменных состояния для $t = 0_+$ $[X(0_+)] = [0,0,0]^T$ принимается согласно пункту 5.2.3.

5.2.9. Составить уравнение связи переменных состояния и искомого напряжения

$$u_{вых,1} = [W][X] + [Z][E_J], \tag{5.2}$$

где $[W]$ и $[Z]$ - топологические матрицы размерности $m \times j$ и $m \times q$, m - число выходных переменных (в нашем случае $m = 1$).

5.3. Выполнение работы на ЭВМ

Вызвать требуемую программу расчета переходных процессов и ввести необходимые данные. По окончании расчетов зафиксировать полученные результаты и сравнить их между собой.

ПРИМЕР: Рассчитать переходный процесс прохождения прямоугольного импульса амплитудой 5В длительностью $T_и = 2мС$ через линейный четырехполюсник (рис. 5.3).

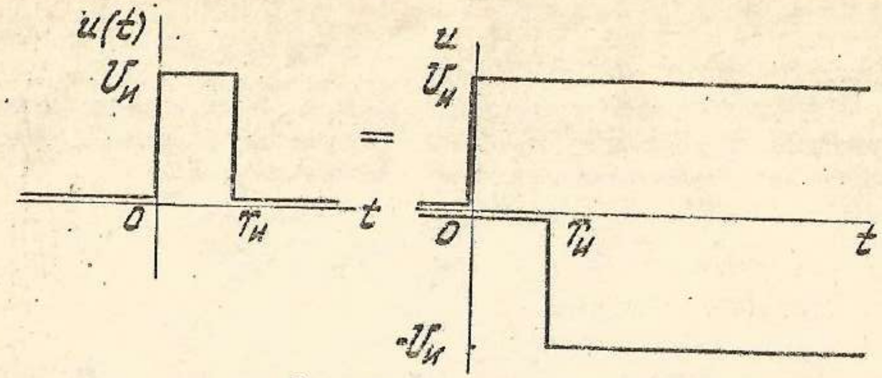
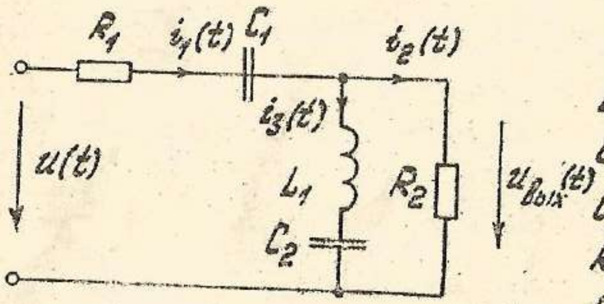


Рис. 5.2.



$L = 1\,Гн$

$C_1 = 1\,мкФ$

$C_2 = 2\,мкФ$

$R_1 = 3\,кОм$

$R_2 = 1{,}5\,кОм$

Рис. 5.3.

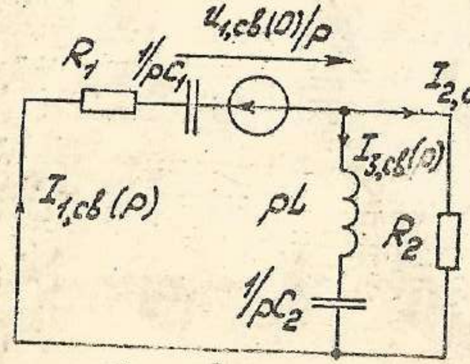


Рис. 5.4.

Подготовка данных для расчета.

1) Классический метод

В схеме замещения четырехполюсника для установившегося режима от действия первой ступенчатой функции $e(t)=E=5\,В$ (рис. 5.2) определим установившееся значение искомого напряжения $U_{2\,уст}$. Методом входного сопротивления составим характеристическое уравнение

$$Z_{вх}(p)=R_1+\frac{1}{pC_1}+\frac{(pL_1+1/(pC_2))\,R_2}{pL_1+1/(pC_2)+R_2},$$

что приводит (после подстановки числовых значений) к кубическому уравнению

$$a_3p^3+a_2p^2+a_1p+a_0=0;$$

где $a_3=9\cdot10^{-9}$; $a_2=11\cdot10^{-6}$; $a_1=7{,}5\cdot10^{-3}$; $a_0=1$.

Начальные независимые условия -нулевые:

$$u_{C1}(0)=0;\ u_{C2}(0)=0;\ i_{L1}(0)=i_3(0)=0. \qquad (5.3)$$

Для определения начальных зависимых условий

$$u_2(0_+);\ u_2'(0+)=\frac{du_2}{dt}\Big|_{t=0+};\ u_2''(0_+)=\frac{d^2u_2}{dt^2}\Big|_{t=0+},$$

составим систему уравнений по законам Кирхгофа для момента времени $t=0_+$

$$\begin{cases} i_1(0_+)-i_2(0_+)-i_3(0_+)=0;\\ Li_1'(0_+)+u_{C2}(0_+)-R_2i_2(0_+)=0;\\ R_1i_1(0_+)+u_{C1}(0_+)+R_2i_2(0_+)=E. \end{cases} \qquad (5.4)$$

Система (5.4) и условия (5.3) позволяют определить любые токи и напряжения для $t=0_+$. В частности, $u_2(0_+)=1{,}666$ Дифференцируя необходимые уравнения из системы (5.3), и, используя уравнения связи между токами и напряжениями в емкостях и индуктивностях

$$u_L(0_+)=Li_L'(0_+)=L\frac{di_L(0_+)}{dt};\ i_C(0_+)=Cu_C'(0_+)=C\frac{du_C(0_+)}{dt},$$

находим остальные зависимые условия:

$$u_2'(0_+)=-2037{,}037\ В/с;\quad u_2''=1{,}934\cdot10^6\ В/с^2$$

2) Операторный метод

Составим операторную схему замещения для свободного режима (рис. 5.4), в которой

$$U_{C1,уст} = 5\,В, \quad u_{C1,св}(0) = u_C(0) - U_{C1,уст}(0) = -5\,В;$$

$$U_{C2,уст} = 0, \quad u_{C2,св}(0) = u_{C2}(0) - U_{C2,уст}(0) = 0\,В;$$

$$I_{L1,уст} = 0, \quad i_{L1,уст}(0) = i_{L1}(0) - I_{L1,уст}(0) = 0\,А.$$

Найдем изображение искомого напряжения $U_{2,св}(p)$, например, с помощью метода узловых потенциалов (за нулевой примем потенциал нижнего узла схемы)

$$\varphi(p)\left(1/R_2 + 1/(R_1 + 1/pC_1) + 1/(pL_1 + 1/pC_2)\right) = (1/p)\left(1/(R_1 + 1/pC_1)\right),$$

$$U_{2св}(p) = \varphi(p) = F_1(p)/F_2(p),$$

$$F_1(p) = a_2 p^2 + a_1 p + a_0,$$

$$F_2(p) = b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0,$$

где

$$a_2 = 15 \cdot 10^{-9}; \quad a_1 = 0; \quad a_0 = 7{,}5 \cdot 10^{-3};$$

$$b_3 = 9 \cdot 10^{-9}; \quad b_2 = 11 \cdot 10^{-6}; \quad b_1 = 7{,}5 \cdot 10^{-3}; \quad b_0 = 1.$$

3) Метод переменных состояния

Из системы уравнений цепи по законам Кирхгофа (рис. 5.3) для произвольного момента времени получим систему уравнений относительно переменных состояния $[X] = [i_3(t);\ u_{C1}(t);\ u_{C2}(t)]^T$

$$\begin{cases} i_3'(t) = \left(-R_1R_2/((R_1+R_2)L_1)\right)i_3(t) - \left(R_2/((R_1+R_2)L_1)\right)u_{C1}(t) - (1/L_1)u_{C2}(t) + \\ \quad + \left(R_2/((R_1+R_2)L_1)\right)E; \\ u_{C1}'(t) = \left(R_2/((R_1+R_2)C_1)\right)i_3 t - \left(1/((R_1+R_2)C_1)\right)u_{C1}(t) + \left(1/((R_1+R_2)C_1)\right)E; \\ u_{C2}'(t) = (1/C_2)\,i_3(t) + E \end{cases}$$

Или в матричной форме $[\dot{X}] = [L][X] + [M][E_J]$, где

$$[L] - \begin{bmatrix} -10^3 & -0{,}333 & -1 \\ 3{,}333 \cdot 10^5 & -2{,}222 & 0 \\ 5 \cdot 10^5 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad [M] - \begin{bmatrix} 0{,}333 \\ 0{,}222 \cdot 10^3 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad [E_J] - 5.$$

Иной способ формирования системы уравнений (5.1) состоит в применении метода наложения, для чего предварительно (в соответствии с принципом компенсации) емкости заменяются источниками ЭДС, а индуктивности - источниками тока (рис. 5.5). В схемах рис. 5.6 а,б,в,г определяются величины, пропорциональные $i_L' = i_3'$ (это $u_L = L i_L'$) и u_0' (это $i_C = C u_C'$), а затем составляются системы уравнений типа (5.1) и (5.2).

$$\begin{cases} u_L = -\left(R_1R_2/(R_1+R_2)\right)i_L + \left(-R_2/(R_1+R_2)\right)u_{C1} + (-1)u_{C2} + \left(R_2/(R_1+R_2)\right)E; \\ i_{C1} = \left(R_2/(R_1+R_2)\right)i_L + \left(-1/(R_1+R_2)\right)u_{C1} + 0\,u_{C2} + \left(1/(R_1+R_2)\right)E; \\ i_{C2} = 1 \cdot i_L + 0 \cdot u_{C1} + 0 \cdot u_{C2} + \left(R_2/(R_1+R_2)\right)E. \end{cases}$$

Составим уравнение связи

$$u_{вых,1}(t) = -\left((R_1R_2)/(R_1+R_2)\right)i_L + \left(-R_2/(R_1+R_2)\right)u_{C1} + 0 \cdot u_{C2} + \left(R_2/(R_1+R_2)\right)E.$$

Перейдем к матричной форме

$$[W] - \begin{bmatrix} -10 \\ -0{,}333 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad [E_J] - 5; \quad [Z] = 0{,}333.$$

СВОДКА РЕЗУЛЬТАТОВ

а) выражение выходного напряжения:

- классический метод

$$x(t) = u_2(t) = 1{,}74552 \cdot e^{-169{,}71 \cdot t} + (-0{,}07885 \cos 614{,}627t - 2{,}8998 \sin 614{,}627 \cdot t)e^{-526{,}256t}$$

- операторный метод

$$x(t) = u_2(t) = 1{,}7456\, e^{-169{,}71 \cdot t} + (-0{,}078935 \cos 614{,}627t - 2{,}8998 \sin 614{,}627 \cdot t)\, e^{-526{,}256t}$$

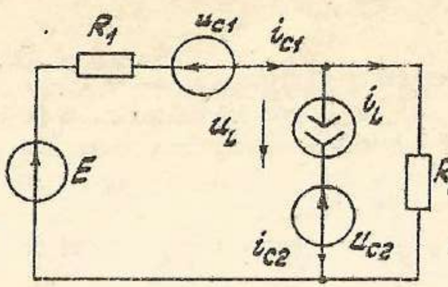


Рис. 5.5

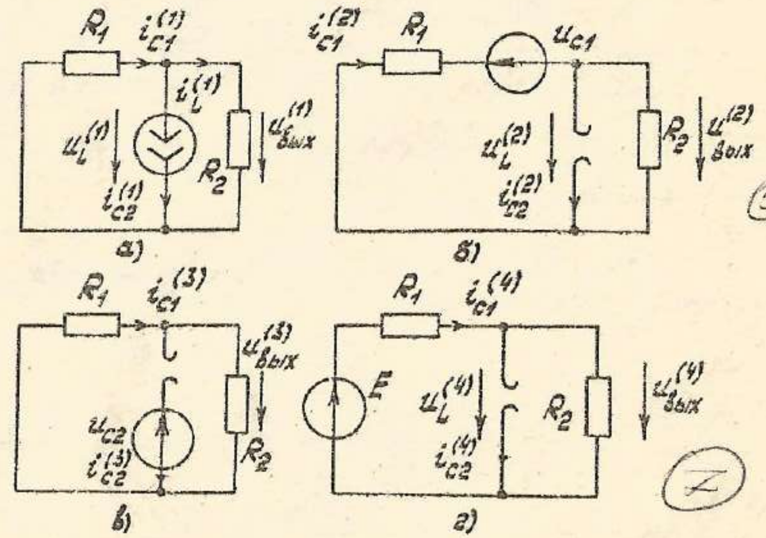


Рис. 5.6.

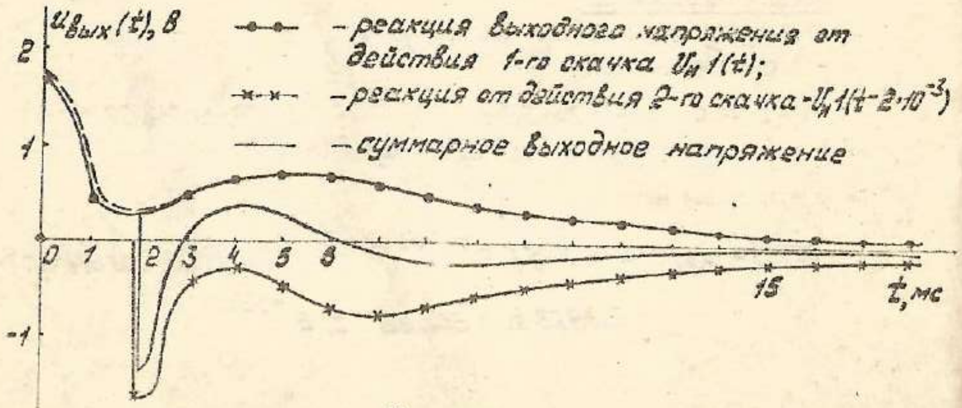


Рис. 5.7.

б) таблица значений выходного напряжения

t, мс	Классический метод	Операторный метод	Метод переменных состояния
0	1.667	1.667	1.667
1	0.4470	0.4471	0.44706
2	0.2802	0.2802	0.2802
3	0.4776	0.4777	0.47765
4	0.6698	0.6698	0.66982
5	0.7385	0.7386	0.73857
6	0.6974	0.6975	0.69748
7	0.5997	0.5997	0.59974
8	0.4910	0.4910	0.49098
9	0.3958	0.3958	0.39588
10	0.3214	0.3215	0.32146
11	0.2656	0.2656	0.26560
12	0.2230	0.2230	0.22305
13	0.1891	0.1892	0.18916
14	0.1609	0.1609	0.16091
15	0.1367	0.1367	0.13670
16	0.1158	0.1158	0.11580
17	0.09782	0.09782	0.097821
18	0.08249	0.08250	0.082498
19	0.06953	0.06953	0.069533
20	0.05861	0.05861	0.058614

Выражение выходного напряжения и его таблица дана без учета того, что через 2 мс импульс исчез. График выходного напряжения приведен на рис. 5.7.

РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА 6

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПИ С НЕЛИНЕЙНЫМ РЕАКТИВНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

Цель работы - освоение метода сопряжения интервалов; выполнение расчета цепи с кусочно-линейным реактивным элементом.

Содержание работы:

В работе для каждого варианта схем (рис. 6.1) выполняются расчеты установившихся режимов и переходного процесса в цепи постоянного тока с одним рективным нелинейным элементом (НЭ), имеющим симметричную кусочно-линейную характеристику. Характеристика НЭ для первого квадранта (положительная ветвь) приведена на рис. 6.2. Параметры точек перегиба для различных вариантов даны в табл. 6.1.

6.1. Подготовка данных

6.1.1. Построить в удобном масштабе характеристику НЭ (положительную и отрицательную ветви).

6.1.2. Определить уравнения линейных участков в виде

$$y_n = a_n x + b_n, \qquad (6.1)$$

где $a_n = dy_n/dx$ - дифференциальный параметр НЭ на линейных участках, n - номер участка.

6.1.3. Методом эквивалентного генератора (нагрузка - нелинейный элемент) привести сложную цепь в установившихся режимах до коммутации и после коммутации к одноконтурной цепи (сводится к определению $R_{экв}$ и $E_{экв}$).

6.1.4. Определить начальную и конечную координаты рабочей точки на характеристике НЭ (т.е. стационарное состояние НЭ до и после коммутации). Координаты начальной точки служат начальными условиями $i_L(0)$ или $u_C(0)$ для расчета переходного процесса.

6.1.5. По законам Кирхгофа определить установившееся значение искомой величины $x_{уст}$ после коммутации.

6.1.6. На основе законов Кирхгофа для заданной схемы составить уравнение, описывающее связь м~~ду~~ искомой величиной $x(t)$ и переменной состояния ($u_C(t)$ или $i_L(t)$) в следующей форме

$$x(t) = d_1 i_L(t) + d_2 \quad \text{или} \quad x(t) = d_1 u_C(t) + d_2,$$

где d_1, d_2 - постоянные коэффициенты.

6.1.7. Составить для одно~~ко~~турной схемы после коммутации характеристическое уравнение в виде

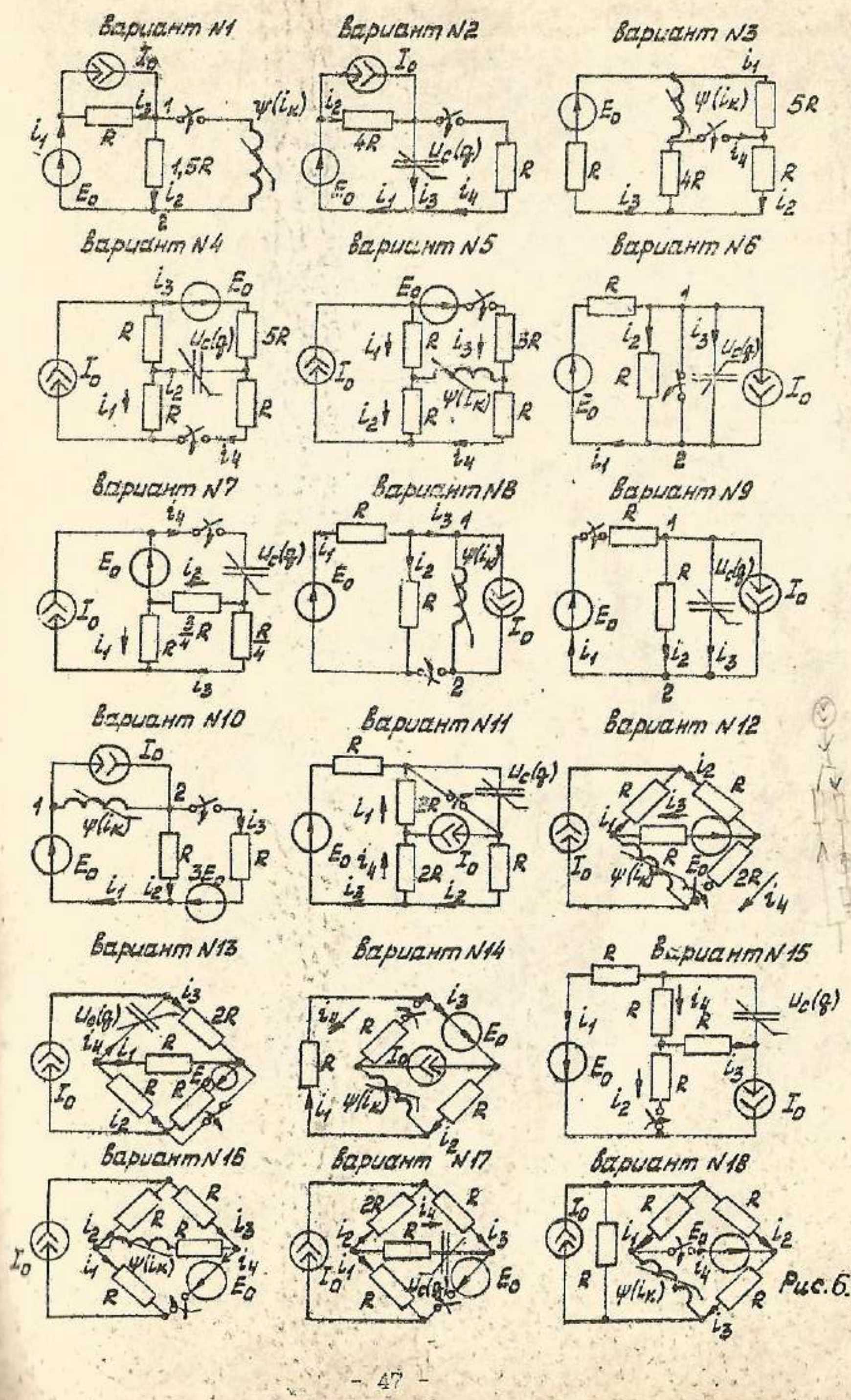


Рис.6.1.а

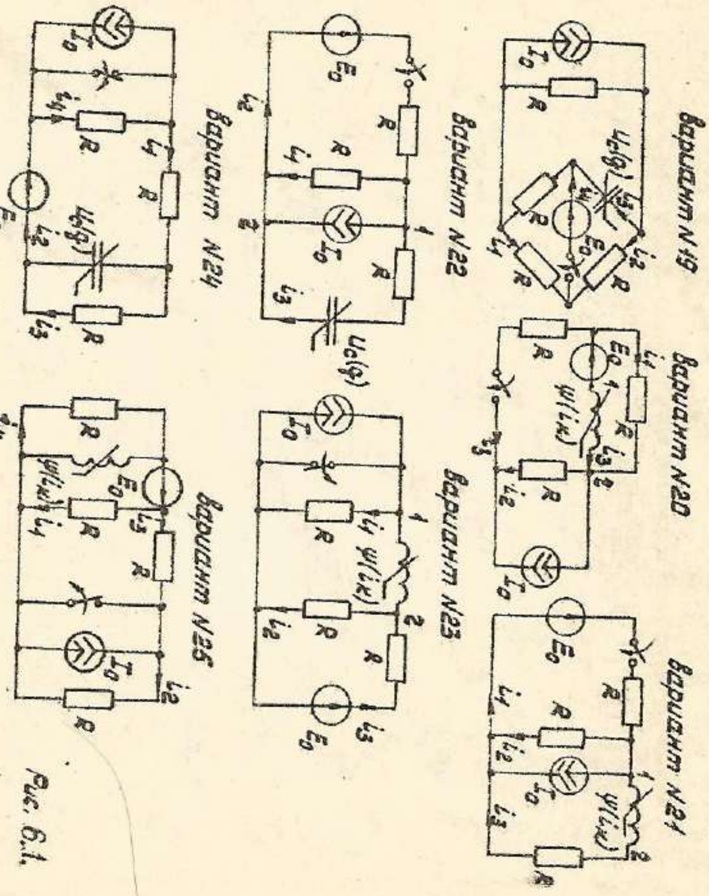


Рис. 6.1.

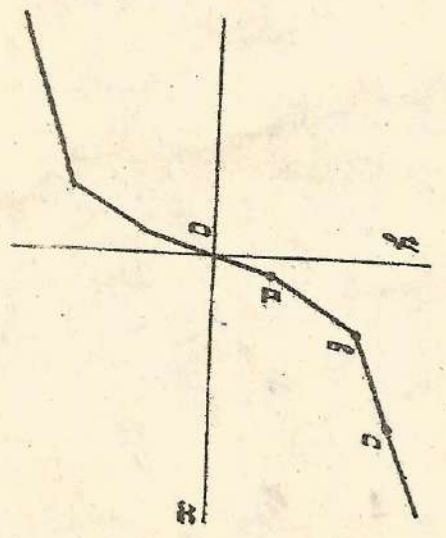


Рис. 6.2.

Таблица 6.1.

ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ СХЕМЫ ЦЕПИ

N п/п	E_0 В	I_0 мА	R кОм	Хар. НЭ	Координаты точек (ϕ-Вб, i-А, q-Кл, u-В)						Искомая величина			
					Ψ a I		b		c		Группа 1	2	3	4
1	50	1000	0.02	ϕ(i)	0.01	0.25	0.02	0.75	0.2575	1.75	i_1	i_2	i_3	u_{12}
2	120	1000	0.02	$q(u_c)$	0.005	20	0.01	80	0.11	120	i_1	i_2	i_3	i_4
3	60	-	0.15	ϕ(i)	0.006	0.08	0.009	0.2	0.01	0.3	i_3	i_2	i_1	i_4
4	12	300	0.10	$q(u_c)$	0.0005	10	0.001	30	0.0012	55	i_3	i_2	i_1	i_4
5	200	600	0.10	ϕ(i)	0.025	0.1	0.035	0.5	0.04	1.0	i_1	i_2	i_3	i_4
6	60	0.4	0.02	$q(u_c)$	0.0004	5	0.0008	15	0.001	35	i_1	i_2	i_3	u_{12}
7	60	200	0.30	$q(u_c)$	0.0004	10	0.0008	30	0.001	70	i_3	i_2	i_1	i_4
8	50	30	0.40	ϕ(i)	0.5	0.02	0.9	0.06	1.1	0.1	i_2	i_1	i_3	u_{12}
9	100	200	0.10	$q(u_c)$	0.0004	5	0.0008	25	0.001	45	i_1	i_3	i_2	u_{12}
10	50	1200	0.05	ϕ(i)	0.02	0.4	0.036	1.2	0.044	2	i_2	i_1	i_3	u_{12}
11	50	1000	0.05	$q(u_c)$	0.02	10	0.04	30	0.05	70	i_3	i_2	i_1	i_4
12	150	300	0.10	ϕ(i)	0.01	0.06	0.018	0.14	0.024	0.26	i_1	i_3	i_2	i_4
13	120	100	0.20	$q(u_c)$	0.008	8	0.016	24	0.02	40	i_2	i_1	i_3	i_4
14	150	30	1.00	ϕ(i)	0.0006	0.01	0.001	0.22	0.0011	0.032	i_3	i_2	i_1	i_4
15	150	30	1.00	$q(u_c)$	0.0024	12	0.004	28	0.0048	44	i_1	i_3	i_2	i_4
16	45	35	1.00	ϕ(i)	0.0005	0.004	0.0009	0.01	0.0011	0.02	i_2	i_1	i_3	i_4
17	60	40	1.00	$q(u_c)$	0.0024	12	0.0036	28	0.0044	52	i_3	i_2	i_1	i_4
18	180	300	1.00	ϕ(i)	0.006	30	0.014	0.05	0.018	0.13	i_2	i_1	i_3	i_4
19	300	300	1.00	$q(u_c)$	0.0007	50	0.0009	120	0.001	200	i_3	i_2	i_1	i_4
20	50	100	1.00	ϕ(i)	0.002	0.01	0.0035	0.03	0.005	0.09	i_1	i_2	i_3	u_{12}
21	60	10	1.00	ϕ(i)	0.05	0.002	0.09	0.006	0.1	0.011	i_2	i_3	i_1	u_{12}
22	60	20	0.50	$q(u_c)$	0.005	4	0.0058	12	0.012	22	i_3	i_1	i_2	u_{12}
23	30	45	1.00	ϕ(i)	0.01	0.004	0.018	0.012	0.022	0.022	i_2	i_3	i_1	u_{12}
24	30	100	1.00	$q(u_c)$	0.005	4	0.01	12	0.014	22	i_1	i_2	i_3	i_4
25	36	220	0.60	ϕ(i)	0.001	0.016	0.002	0.024	0.0024	0.0567	i_1	i_2	i_3	i_4

$$ha_n p + g = 0,$$

где h и g - постоянные коэффициенты, которые необходимо вычислить.

6.2. Расчет на ЭВМ

Вызвать программу расчета переходного процесса в нелинейной цепи.

Ввести: число участков НЭ, постоянные коэффициенты характеристического уравнения h и g, установившееся значение искомой величины $x_{уст}$, коэффициенты d_1 и , независимое начальное условие $u_c(0)$ или $i_L(0)$, а затем последовательно абсциссу и ординату сначала одной, а затем другой граничных точек начального участка.

ЭВМ вычисляет постоянную интегрирования в общем решении уравнения цепи, момент окончания начального участка и выводит искомую функцию $x(t)$, а также момент окончания начального участка. Вводятся абсцисса и ордината следующей точки НЭ и процесс повторяется. На последнем участке переходный процесс рассчитывается вплоть до момента 3τ, τ - постоянная цепи (за время 3τ - свободная составляющая затухает примерно в 20 раз).

6.3. Оформление результатов

Пояснительная записка к типовому расчету должна содержать:

а) Задание на выполнение типового расчета.

б) Описание этапов расчета переходного процесса.

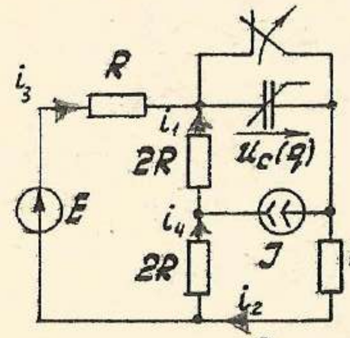
в) Общий график переходного процесса.

График должен быть оформлен в соответствии с существующими правилами (указание равномерных масштабных делений и величин на осях, четкая простановка точек и т.д.).

На графике должны быть указаны моменты сопряжения интервалов. Продолжительность графика должна быть достаточной для определения по нему времени установления переходного процесса.

ПРИМЕР: Выполнить расчет установившегося и переходного процессов в цепи постоянного тока с одной нелинейной емкостью (рис. 6.3), имеющей симметричную кусочно-линейную характеристику (рис. 6.4). Определению подлежит ток $i_3(t)$.

1. Определим уравнения линейных участков емкости, подставив в выражение (6.1) координаты точек характеристики НЭ на соответствующем участке



$E = 50$ В,
$J = 1$ А,
$R = 50$ Ом.

Рис. 6.3.

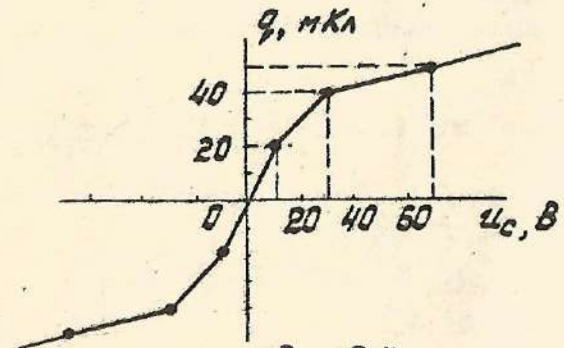


Рис. 6.4.

1-й участок $\begin{cases} q_1(-70) = a_1(-70) + b_1 = -50 \\ q_1(-30) = a_1(10) + b_1 = -40 \end{cases}$

откуда следует $a_1 = 0{,}025\ мКл/В$, $b_1 = -32{,}5\ мКл$, $q_1(u_c) = 2u_c$.
Аналогично находим уравнения для других участков:

2-й участок $q_2(u_c) = u_c - 10$; $a_2 = 1$; $b_2 = -10$;

3-й участок $q_3(u_c) = 2u_c$; $a_3 = 2$; $b_3 = 0$;

4-й участок $q_4(u_c) = u_c + 10$; $a_4 = 1$; $b_4 = 10$;

5-й участок $q_5(u_c) = 0{,}25u_c + 32{,}5$; $a_5 = 0{,}25$; $b_5 = 32{,}5$.

2. Используя метод эквивалентного генератора относительно нелинейной емкости, упростим исходную цепь (рис. 6.5)

$$R_{экв} = R + 4R^2/(4R + R) = 90\ Ом,$$
$$E_{экв} = U_{ab} = 110\ В,$$

где U_{ab} - определяется любым удобным способом.

3. Определим координаты начальной и конечной рабочих точек на характеристике из схем для установившегося режима до и после коммутации

$u_c(0) = 0$ (емкость закорочена), $u_{уст}(t) = U_{ab} = 110\ В$.

4. На основе уравнений Кирхгофа в цепи (рис. 6.3)

$$\begin{cases} Ri_3(t) - 2Ri_1(t) - 2Ri_4(t) = E; \\ 2Ri_1(t) + 2Ri_4(t) + Ri_2(t) + u_c(t) = 0; \\ i_1(t) - i_4(t) = J; \\ i_2(t) - i_3(t) - i_4(t) = 0 \end{cases}$$

составим (например, методом исключения Гаусса) уравнение связи между искомой величиной $i_3(t)$ и переменной состояния $u_c(t)$

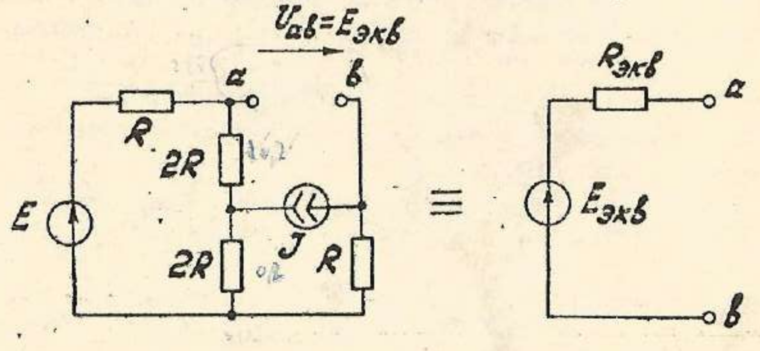
$$i_3(t) = d_1 u_c(t) + d_2,$$

где $d_1 = -0{,}09$, $d_2 = 0{,}778$ - вычисляемые константы.

5. Составим характеристическое уравнение цепи, учитывая, что $a_n = dq/du_c = \Delta q/\Delta u$ - дифференциальный параметр нелинейной емкости на n-м линейном участке

$R_{экв} + 1/(pa_n) = 0$ или $R_{экв}\, p a_n + 1 = 0$,
откуда следует, что $\tau = R_{экв} = 90$, $g = 1$.

График процесса, рассчитанного на ЭВМ, приведен на рис. 6.6.



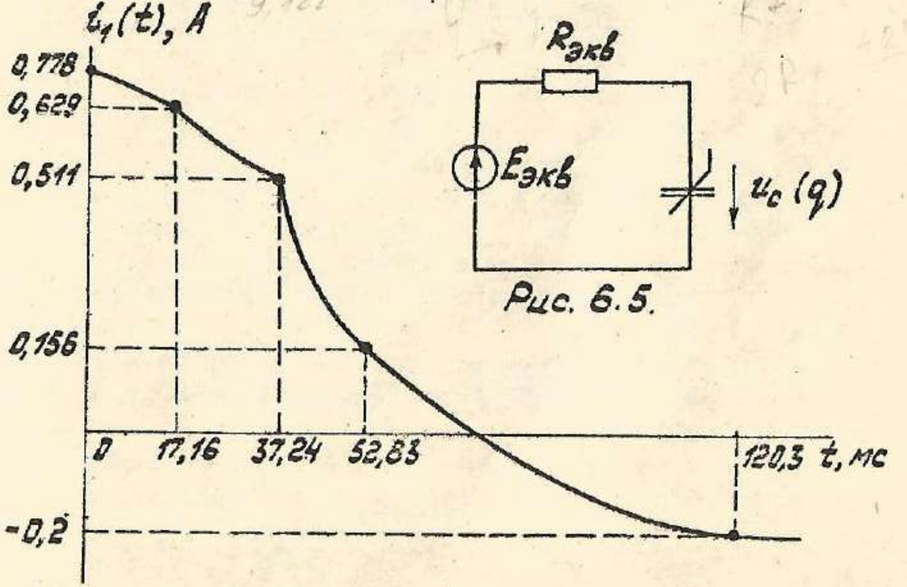


Рис. 6.6.

РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА 7

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ДЛИННОЙ ЛИНИИ

Цель расчета - освоение волнового метода анализа переходных процессов в цепях с распределенными параметрами.

7.1. Содержание работы - определение волн тока и напряжений, возникающих при коммутации, а также вследствие отражения от неоднородности или прохождения через неоднородность; применение метода наложения для определения электрических величин, построение их графиков.

Требуется определить все волны напряжения и тока, возникшие в линиях к указанному в задании моменту времени T, записать уравнения этих волн в виде функций

$u_{пр}(x,t)$, $u_{обр}(x,t)$, $i_{пр}(x,t)$, $i_{обр}(x,t)$,

построить друг под другом графики волн напряжения и результирующий график

$$u(x,T) = u_{предш}(x,T) + \sum u_{пр}(x,T) + \sum u_{обр}(x,T),$$

а также график тока

$$i(x,T) = i_{предш}(x,T) + \sum i_{пр}(x,T) - \sum i_{обр}(x,T).$$

7.2. Указания.

7.2.1. Цепь (рис. 7.1) содержит две одинаковые линии без потерь, у которых даны

$R_в$ - волновое сопротивление,

τ - время пробега волны вдоль одной линии,

источник напряжения U, подведенного к первой линии непосредственно или через сосредоточенный элемент.

7.2.2. Коммутация совершается в месте соединения линий в момент времени $t=0$.

7.2.3. В каждой схеме находятся два сосредоточенных элемента (сопротивление, индуктивность или емкость), влияющих на протекание переходного процесса.

7.2.4. В некоторых схемах пунктиром указано сопротивление утечки конденсатора R_y, величина которого несравненно больше $R_в$.

7.3. Данные к расчету. Величины $U, R_в, \tau, R, L$ для каждой академической группы принимаются следующими

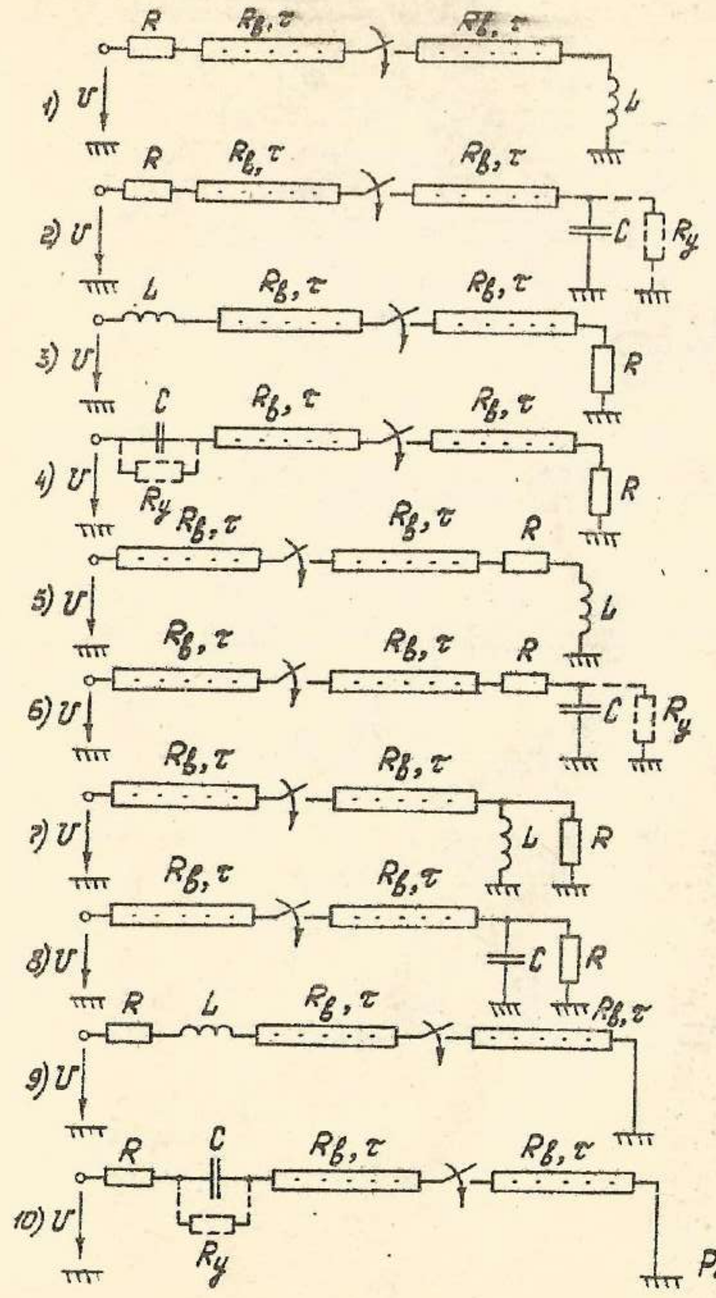


Рис. 7.1.

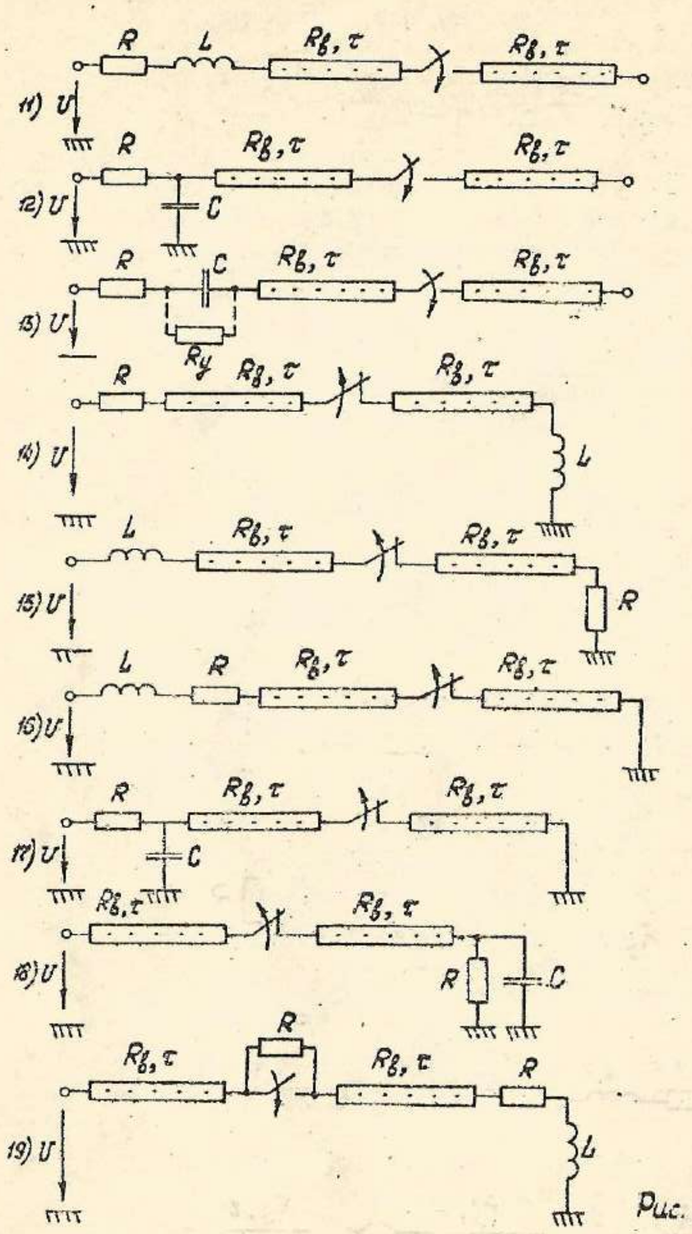

11) U
12) U
13) U
14) U
15) U
16) U
17) U
18) U
19) U
R
L
C
R_y
$R_в, \tau$

Рис. 7.1.

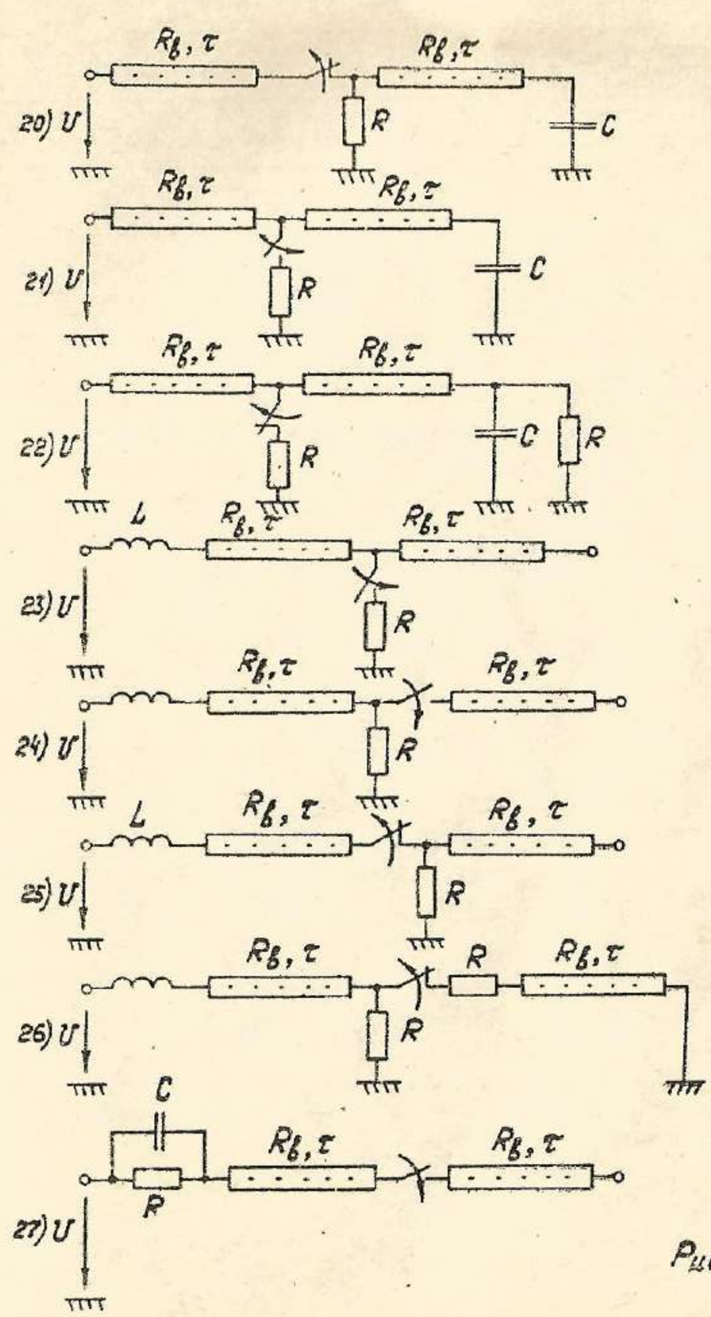

20) U
21) U
22) U
23) U
24) U
25) U
26) U
27) U
R
L
C
$R_в, \tau$

Рис. 7.1.

Группа	U, В	$R_в$, кОм	τ, мс	R, кОм	L, Гн	C, мкФ
1	30	1	0,50	2,0	1,00	0,22
2	15	1	0,75	3,0	1,25	0,27
3	5	1	1,00	4,0	1,50	0,33
4	10	1	0,40	0,5	0,60	0,39

Момент времени T, для которого должно быть построено распределение напряжений и токов вдоль линии, задается в долях от времени τ. Ниже приведены значения T/τ.

Группа	1	2	3	4
T/τ	4,2	4,4	4,6	4,8

ПРИМЕР:

Дано: U = 30 В; $R_в$ = 1 кОм; τ = 0,5 мс;
R = 4 кОм; L = 1,00 Гн.

Для момента времени T =2,8τ построить распределение напряжений и токов вдоль линии. Схема изображена на рис. 7.2.

РЕШЕНИЕ. 1. Расчет предшествующего режима. Первая линия была заряжена до напряжения U, вторая не заряжена; токи в линиях не протекали:

$$u_{предш,1} = U; \quad u_{предш,2} = 0;$$
$$i_{предш,1} = 0; \quad i_{предш,2} = 0.$$

2. Для расчета первых волн, возникающих в месте замыкания ключа, определим напряжение на ключе

$$u_{кл} = U = 30\ В$$

и воспользуемся схемой замещения по рис. 7.3. Из рис. 7.3 видно, что во второй линии побежит прямая волна напряжения

$$u'_{2пр} = u_{кл} = U = 30\ В$$

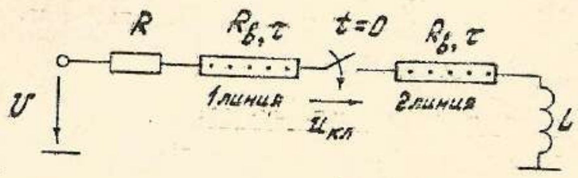


Рис. 7.2.

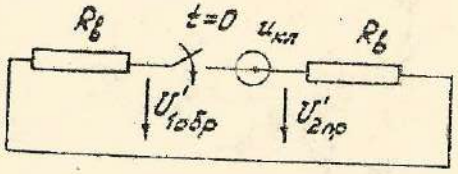


Рис. 7.3.

и тока

$$i'_{2пр} = \frac{u'_{2пр}}{R_в} = \frac{U}{R_в} = 30\ mA,$$

а в первой - обратная

$$U'_{1обр} = -u_{кл} = -U = -30\ В$$

и тока

$$i'_{1обр} = -\frac{u_{кл}}{R_в} = -30\ mA.$$

3. Через время τ первые волны "добегут", соответственно, до конца второй линии, и до начала первой линии.

Для расчета отраженных волн воспользуемся понятием о коэффициентах отражения

$$N(p) = U_{отр}(p)/U_{пад}(p),$$

Для линии 2 $\quad U_{пад}(p) = U/p, \quad N(p) = \dfrac{pL - R_в}{pL + R_в}$

$$U'_{2обр}(p) = U_{2отр}(p) = \frac{U}{p}\,\frac{pL - R_в}{pL + R_в} = \frac{U}{p}\cdot\frac{p - R_в/L}{p + R_в/L}.$$

Оригинал

$$u'_{2обр}(t') = -\frac{R_в/L}{R_в/L}\cdot U + \frac{-2R_в/L}{-R_в/L}\cdot U e^{-t\cdot\frac{R_в}{L}} =$$

$$= -U + 2U e^{-t\cdot R_в/L} = -30 + 60 e^{-10^3\cdot t},\ В$$

$$i'_{2обр}(t) = u'_{2обр}(t)/R_в = -30 + 60 e^{-10^3\cdot t},\ mA$$

$$t' = t - \tau.$$

Для произвольного места x', отсчитываемого от конца линии 2

$$i'_{2обр}(t', x') = -30 + 60 e^{-10^3\left(t' - \frac{x'}{\vartheta}\right)},\ mA$$

$$u'_{2обр}(t', x') = -30 + 60 e^{-10^3\left(t' - \frac{x'}{\vartheta}\right)},$$

где ϑ - скорость волны, $l = \tau\cdot\vartheta$.

Для линии 1

$$u_{пад} = -U; \quad N = \frac{R - R_в}{R + R_в} = \frac{4 - 1}{4 + 1} = 0{,}6$$

$$u'_{1пр}(t') = -U\cdot 0{,}6 = -30\cdot 0{,}6 = -18\ В$$

$$i'_{1пр}(t') = -u'_{1пр}(t)/R_в = -18\ mA.$$

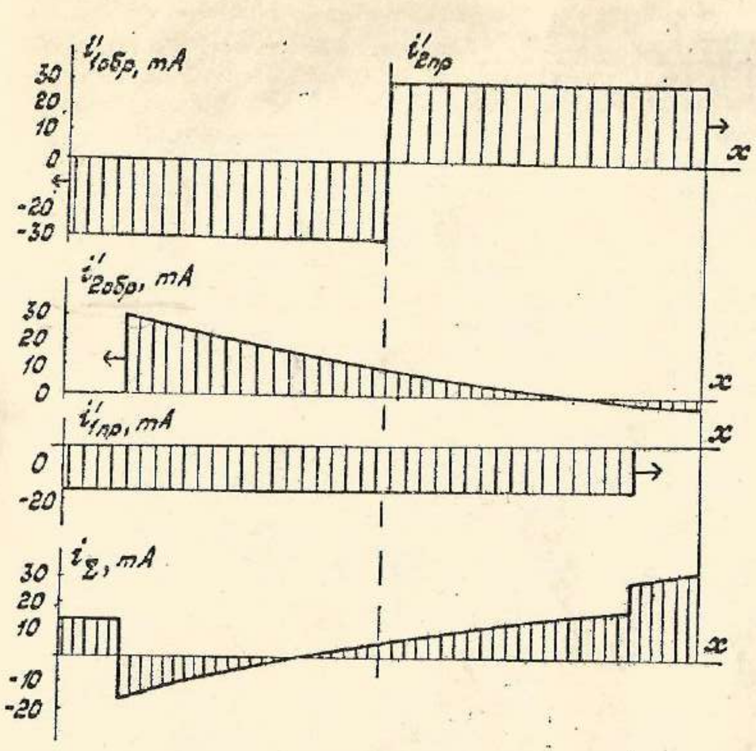


Рис. 7.3а. Эпюры токов

$$i(x,t) = i_{предш}(x,t) + \sum i_{пр}(x,t) - \sum i_{обр}(x,t)$$

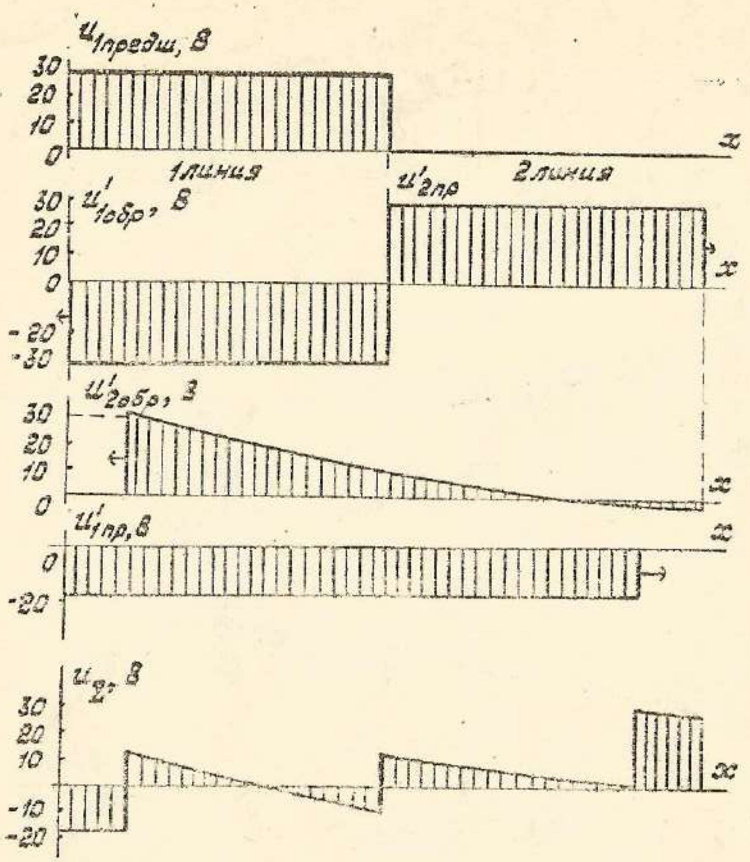


Рис. 7.3б. Эпюры напряжений

$u(x,t)=u_{предш}+\sum u_{пр}(x,t)+\sum u_{обр}(x,t)$

Для произвольного места x, отсчитываемого от начала линии 1

$$i'_{1пр}(t',x)=-18\ mA,\quad u'_{1пр}(t',x)=-18\ В.$$

Других отражений для заданного времени $T=2.8\tau$ не наблюдается.

Эпюры напряжения и тока приведены на рис. 7.6.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ электрических цепей: Метод. указания к выполнению расчетно- графических работ/ Составитель Ю.Я. Лямец; Чуваш. ун-т. Чебоксары, 1989. 56 с.

2. Установившиеся режимы электрических цепей: Метод. указания к выполнению расчетно-графических работ на микроЭВМ "Электроника ДЗ-28" / Составитель В.А. Ильин; Чуваш. ун-т. Чебоксары, 1985. 48 с.

3. Переходные процессы в электрических цепях. Нелинейные цепи: Методические указания к выполнению расчетно-графических работ на микроЭВМ "Электроника ДЗ-28" / Составитель В.А. Ильин; Чуваш. ун-т. Чебоксары, 1985. 39 с.

4. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В. и др. Основы анализа цепей: Учебник для втузов. 5-изд., перераб. М: Энергоатомиздат, 1989. 528 с.