

Анализ работы электротехнических устройств сегодня невозможно представить без использования компьютеров, и это приводит к необходимости уточнения ряда понятий и расчетных приемов традиционной электротехники.

Целью настоящего пособия является последовательное рассмотрение основных этапов расчета сложных электрических цепей с применением вычислительной техники.

Для расчета электрических линейных и нелинейных цепей в установившемся и переходном режимах можно использовать различные программные продукты, например: *Design Center*, *Electronics Workbench*, *PSPICE (OrCAD)*, *Lab View*, *MATLAB* и другие. Учитывая учебный характер работы, расчет токов и напряжений с представлением результатов в цифровом и графическом виде целесообразно выполнять с помощью программного пакета *MathCAD*.

Известно, что информацию о структуре и параметрах электрической цепи удобно вводить в компьютер табличным методом [3]. Далее по известному алгоритму программа составляет уравнения по методу узловых напряжений, методу контурных токов или другим методам [2], соответствующим режиму работы цепи. Такой подход характерен для программных пакетов, предназначенных для научных или инженерных исследований. В учебных же целях методически целесообразно составление уравнений вручную и ввод их в компьютер в матричном виде. Это позволяет, с одной стороны, проконтролировать знание теории электрических цепей, а с другой — переложить выполнение рутинных математических операций (решение систем алгебраических и дифференциальных уравнений) на компьютер. При этом для выполнения расчетов в среде *MathCAD* необходимо лишь знание основ синтаксиса этого пакета и умение пользоваться несколькими функциями.

Материал пособия налагается применительно к анализу электрической цепи с одним нелинейным двухполюсником резистивного типа и несколькими источниками энергии различного вида. Варианты структуры исследуемой цепи и ее параметров указаны в разд. 1. Методические рекомендации для выполнения расчетов вручную приведены в разд. 2, для расчета на компьютере — в разд. 3.

# 1. ТИПОВЫЕ ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЯ НА ИССЛЕДОВАНИЕ СЛОЖНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Ниже приведены возможные варианты задания на исследование сложной нелинейной электрической цепи с источниками энергии различного вида. Эти варианты могут использоваться в качестве задания для курсовой работы. Модульный принцип построения работы позволяет, в случае необходимости, заменять задание на ее выполнение, исключив часть разделов в соответствии с объемом изучаемого курса. В полном варианте она рассчитана на 16 аудиторных часов и 40 часов самостоятельной работы.

## Постановка задачи

Исследовать электрическую цепь с нелинейным резистивным двухполюсником, в которой действуют источник постоянной ЭДС  $E$  и источники однофазной синусоидальной ЭДС  $e = E_m \sin(\omega t + \psi_e)$  и однофазного синусоидального тока  $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$  с частотой  $f = 400$  Гц. Схемы цепи приведены на рис. 1.1—1.30, параметры элементов цепи — в табл. 1.1, вольт-амперные характеристики нелинейного двухполюсника (ВАХ НД) — в табл. 1.2.

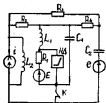


Рис. 1.1

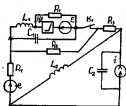


Рис. 1.2

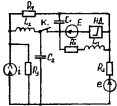


FIG. 1.3

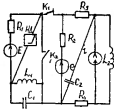


FIG. 1.4

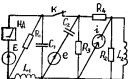


FIG. 1.5

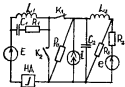


FIG. 1.6

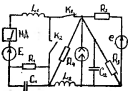


FIG. 1.7

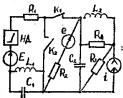


FIG. 1.8

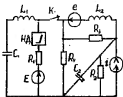


FIG. 1.9

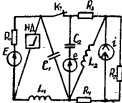


FIG. 1.10

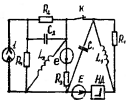


FIG. 1.11

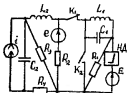


FIG. 1.12

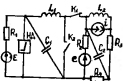


FIG. 1.13



FIG. 1.14

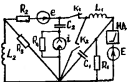


FIG. 1.15

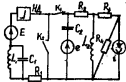


FIG. 1.16

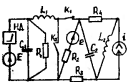


FIG. 1.17

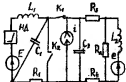


FIG. 1.18

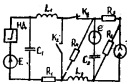


FIG. 1.19

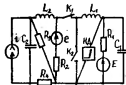


FIG. 1.20

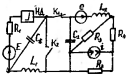


FIG. 1.21

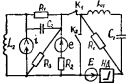


FIG. 1.22

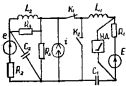


FIG. 1.23

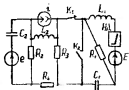


FIG. 1.24

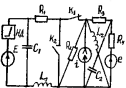


FIG. 1.25

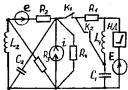


FIG. 1.26

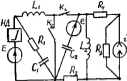


Рис. 1.27

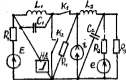


Рис. 1.28

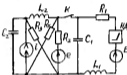


Рис. 1.29

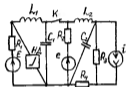


Рис. 1.30

### Задание 1. Расчёт установившегося режима

В качестве объекта анализа выступает цепь в докоммутационном режиме, представляющая собой нелинейную цепь несинусоидального тока. Расчёт установившегося режима в ней может быть проведён только приближённо на основе ряда допущений. В работе в качестве таких допущений приняты следующие:

— так как по условиям задания (см. табл. 1.1) влияние источника постоянной ЭДС  $E$  на токораспределение в цепи существенно больше, чем влияние источников синусоидальных ЭДС и тока, действием последних можно пренебречь;

— если провести линеаризацию ВАХ НД, то цепь становится линейной и к ней применим принцип наложения, в результате чего токораспределение может быть рассчитано путём сложения постоянных и синусоидальных составляющих токов в ветвях цепи.

Таблица 1.1

Номер параллеля	Номер рисунка	$L_1$ , В	$L_2$ , В	$L_3$ , А	$\varphi_1$ , град	$\varphi_2$ , град	$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$R_3$ , Ом	$R_4$ , Ом	$L_1$ , мГн	$L_2$ , мГн	$C_1$ , мкФ	$C_2$ , мкФ	ВАХ, В/д
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1.1	140	12	0,1	0	0	25	30	20	28	10	20	5,00	10,00	1
2	1.2	140	12	0,1	30	35	27	32	22	30	12	22	5,03	9,97	2
3	1.3	140	12	0,1	60	65	29	34	24	32	14	24	5,06	9,94	3
4	1.4	140	12	0,1	90	95	31	36	26	34	16	26	5,09	9,91	4
5	1.5	140	12	0,1	120	125	33	38	28	36	18	28	5,12	9,88	5
6	1.6	140	12	0,1	150	155	35	40	30	38	20	30	5,15	9,85	6
7	1.7	140	12	0,1	180	185	37	42	32	40	22	32	5,18	9,82	7
8	1.8	140	12	0,1	-150	-145	39	44	34	42	24	34	5,21	9,79	8
9	1.9	140	12	0,1	-120	-115	41	46	36	44	26	36	5,24	9,76	9
10	1.10	140	12	0,1	-90	-85	43	48	38	46	28	38	5,27	9,73	10
11	1.11	140	12	0,1	-60	-55	45	50	40	48	30	40	5,30	9,70	1
12	1.12	140	12	0,1	-30	-25	47	52	42	50	32	42	5,33	9,67	2
13	1.13	140	12	0,1	0	5	49	54	44	52	34	44	5,36	9,64	3
14	1.14	140	12	0,1	30	35	51	56	46	54	36	46	5,39	9,61	4
15	1.15	140	12	0,1	60	65	53	58	48	56	38	48	5,42	9,58	5



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
16	1.16	140	12	0,1	90	95	55	60	50	58	40	50	5,45	9,55	6
17	1.17	140	12	0,1	120	125	57	62	52	60	42	52	5,48	9,52	7
18	1.18	140	12	0,1	150	155	59	64	54	62	44	54	5,51	9,49	8
19	1.19	140	12	0,1	180	185	61	66	56	64	46	56	5,54	9,46	9
20	1.20	140	12	0,1	-150	-145	63	68	58	66	48	58	5,57	9,43	10
21	1.21	140	12	0,1	-120	-115	65	70	60	68	50	60	5,60	9,40	1
22	1.22	140	12	0,1	-90	-85	67	72	62	70	48	56	5,63	9,37	2
23	1.23	140	12	0,1	-60	-55	69	74	64	72	46	56	5,66	9,34	3
24	1.24	140	12	0,1	-30	-25	71	76	66	74	44	54	5,69	9,31	4
25	1.25	140	12	0,1	45	50	73	78	68	76	42	52	5,72	9,28	5
26	1.26	140	12	0,1	45	50	75	80	70	78	40	50	5,75	9,25	6
27	1.27	140	12	0,1	45	50	77	82	72	80	38	48	5,78	9,22	7
28	1.28	140	12	0,1	45	50	79	84	74	82	36	46	5,81	9,19	8
29	1.29	140	12	0,1	30	35	81	86	76	84	34	44	5,84	9,16	9
30	1.30	140	12	0,1	30	35	83	88	78	86	32	42	5,87	9,13	10
31	1.1	100	10	0,3	30	35	85	90	80	88	30	40	5,90	9,10	1
32	1.2	100	10	0,3	0	5	87	92	82	90	28	38	5,93	9,07	2
33	1.3	100	10	0,3	150	155	89	94	84	92	26	36	5,96	9,04	3
34	1.4	100	10	0,3	120	125	91	96	86	94	24	34	5,99	9,01	4
35	1.5	100	10	0,3	90	95	93	98	88	96	22	32	6,02	8,98	5
36	1.6	100	10	0,3	60	65	95	100	90	98	20	30	6,05	8,95	6
37	1.7	100	10	0,3	0	5	97	102	92	100	18	28	6,08	8,92	7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
38	1.8	100	10	0,3	30	35	99	104	94	102	16	26	6,11	8,89	8
39	1.9	100	10	0,3	60	65	101	106	96	104	14	24	6,14	8,86	9
40	1.10	100	10	0,3	90	95	103	108	98	106	12	22	6,17	8,83	10
41	1.11	100	10	0,3	120	125	105	110	100	108	10	20	6,20	8,80	1
42	1.12	100	10	0,3	0	5	107	112	102	110	12	22	6,23	8,77	2
43	1.13	100	10	0,3	15	20	109	114	104	112	14	24	6,26	8,74	3
44	1.14	100	10	0,3	30	35	111	116	106	114	16	26	6,29	8,71	4
45	1.15	100	10	0,3	45	50	113	118	108	116	18	28	6,32	8,68	5
46	1.16	100	10	0,3	60	65	115	120	110	118	20	30	6,35	8,65	6
47	1.17	100	10	0,3	75	80	113	118	108	116	22	32	6,38	8,62	7
48	1.18	100	10	0,3	90	95	111	116	106	114	24	34	6,41	8,59	8
49	1.19	100	10	0,3	105	110	109	114	104	112	26	36	6,44	8,56	9
50	1.20	100	10	0,3	120	125	107	112	102	110	28	38	6,47	8,53	10
51	1.21	100	10	0,3	135	140	105	110	100	108	30	40	6,50	8,50	1
52	1.22	100	10	0,3	150	155	103	108	98	106	32	42	6,53	8,47	2
53	1.23	100	10	0,3	165	170	101	106	96	104	34	44	6,56	8,44	3
54	1.24	100	10	0,3	180	185	99	104	94	102	36	46	6,59	8,41	4
55	1.25	100	10	0,3	190	195	97	102	92	100	38	48	6,62	8,38	5
56	1.26	100	10	0,3	205	210	95	100	90	98	40	50	6,65	8,35	6
57	1.27	100	10	0,3	220	225	93	98	88	96	42	52	6,68	8,32	7
58	1.28	100	10	0,3	235	240	91	96	86	94	44	54	6,71	8,29	8
59	1.29	100	10	0,3	250	255	89	94	84	92	46	56	6,74	8,26	9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
60	1.30	100	10	0,3	235	240	67	92	62	90	48	58	6,77	8,23	10
61	1.1	80	3	0,2	225	230	85	90	80	88	50	60	6,80	8,20	1
62	1.2	80	3	0,2	215	220	83	88	78	86	10	20	6,83	8,17	2
63	1.3	80	3	0,2	205	210	81	86	76	84	12	22	6,86	8,14	3
64	1.4	80	3	0,2	195	200	79	84	74	82	14	24	6,89	8,11	4
65	1.5	80	3	0,2	185	190	77	82	72	80	16	26	6,92	8,08	5
66	1.6	80	3	0,2	175	180	75	80	70	78	18	28	6,95	8,05	6
67	1.7	80	3	0,2	165	170	73	78	68	76	20	30	6,98	8,02	7
68	1.8	80	3	0,2	155	160	71	76	66	74	22	32	7,01	7,99	8
69	1.9	80	3	0,2	145	150	69	74	64	72	24	34	7,04	7,96	9
70	1.10	80	3	0,2	135	140	67	72	62	70	26	36	7,07	7,93	10
71	1.11	80	3	0,2	125	130	65	70	60	68	28	38	7,10	7,90	1
72	1.12	80	3	0,2	115	120	63	68	58	66	30	40	7,13	7,87	2
73	1.13	80	3	0,2	105	110	61	66	56	64	32	42	7,16	7,84	3
74	1.14	80	3	0,2	95	100	59	64	54	62	34	44	7,19	7,81	4
75	1.15	80	3	0,2	85	90	57	62	52	60	36	46	7,22	7,78	5
76	1.16	80	3	0,2	75	80	55	60	50	58	38	48	7,25	7,75	6
77	1.17	80	3	0,2	65	70	53	58	48	56	40	50	7,28	7,72	7
78	1.18	80	3	0,2	55	60	51	56	46	54	42	52	7,31	7,69	8
79	1.19	80	3	0,2	45	50	49	54	44	52	44	54	7,34	7,66	9
80	1.20	80	3	0,2	35	40	47	52	42	50	46	56	7,37	7,63	10
81	1.21	80	3	0,2	25	30	45	50	40	48	48	58	7,40	7,60	1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
82	1.22	80	3	0,2	15	20	43	48	38	46	50	60	7,43	7,57	2
83	1.23	80	3	0,2	5	10	41	46	36	44	48	58	7,46	7,54	3
84	1.24	80	3	0,2	-5	0	39	44	34	42	46	56	7,49	7,51	4
85	1.25	80	3	0,2	-15	-10	37	42	32	40	44	54	7,52	7,48	5
86	1.26	80	3	0,2	-25	-20	35	40	30	38	42	52	7,55	7,45	6
87	1.27	80	3	0,2	-35	-30	33	38	28	36	40	50	7,58	7,42	7
88	1.28	80	3	0,2	-45	-40	31	36	26	34	38	48	7,61	7,39	8
89	1.29	80	3	0,2	-55	-50	29	34	24	32	36	46	7,64	7,36	9
90	1.30	80	3	0,2	-65	-60	27	32	22	30	34	44	7,67	7,33	10
91	1.1	120	10	0,2	-75	-70	25	30	20	28	32	42	7,70	7,30	1
92	1.2	120	10	0,2	-85	-80	27	32	22	30	30	40	7,73	7,27	2
93	1.3	120	10	0,2	-95	-90	29	34	24	32	28	38	7,76	7,24	3
94	1.4	120	10	0,2	-105	-100	31	36	26	34	26	36	7,79	7,21	4
95	1.5	120	10	0,2	-115	-110	33	38	28	36	24	34	7,82	7,18	5
96	1.6	120	10	0,2	-125	-120	35	40	30	38	22	32	7,85	7,15	6
97	1.7	120	10	0,2	-135	-130	37	42	32	40	20	30	7,88	7,12	7
98	1.8	120	10	0,2	-145	-140	39	44	34	42	18	28	7,91	7,09	8
99	1.9	120	10	0,2	-155	-150	41	46	36	44	16	26	7,94	7,06	9
100	1.10	120	10	0,2	-165	-160	43	48	38	46	14	24	7,97	7,03	10
101	1.11	120	10	0,2	-175	-170	45	50	40	48	12	22	8,00	7,00	1
102	1.12	120	10	0,2	-185	-180	47	52	42	50	10	20	8,03	6,97	2
103	1.13	120	10	0,2	-195	-190	49	54	44	52	12	22	8,06	6,94	3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
126	1.6	140	12	0,1	-285	-210	95	100	90	98	16	26	8,75	6,25	6
127	1.7	140	12	0,1	-275	-210	97	102	92	100	18	28	8,78	6,22	7
128	1.6	140	12	0,1	-265	-250	99	104	94	102	20	30	8,81	6,19	8
129	1.9	140	12	0,1	-255	-210	101	106	96	104	22	32	8,84	6,16	9
130	1.10	140	12	0,1	-245	-210	103	108	98	106	24	34	8,87	6,13	10
131	1.11	140	12	0,1	-235	-210	105	110	100	108	26	36	8,90	6,10	1
132	1.12	140	12	0,1	-225	-210	107	112	102	110	28	38	8,93	6,07	2
133	1.13	140	12	0,1	-215	-210	109	114	104	112	30	40	8,96	6,04	3
134	1.14	140	12	0,1	-205	-200	111	116	106	114	32	42	8,99	6,01	4
135	1.15	140	12	0,1	-195	-190	113	118	108	116	34	44	9,02	5,98	5
136	1.16	140	12	0,1	-185	-180	115	120	110	118	36	46	9,05	5,95	6
137	1.17	140	12	0,1	-175	-170	113	118	108	116	38	48	9,08	5,92	7
138	1.18	140	12	0,1	-165	-160	111	116	106	114	40	50	9,11	5,89	8
139	1.19	140	12	0,1	-155	-150	109	114	104	112	42	52	9,14	5,86	9
140	1.20	140	12	0,1	-145	-140	107	112	102	110	44	54	9,17	5,83	10
141	1.21	140	12	0,1	-135	-130	105	110	100	108	46	56	9,20	5,80	1
142	1.22	140	12	0,1	-125	-120	103	108	98	106	48	58	9,23	5,77	2
143	1.23	140	12	0,1	-115	-110	101	106	96	104	50	60	9,26	5,74	3
144	1.24	140	12	0,1	-105	-100	99	104	94	102	48	58	9,29	5,71	4
145	1.25	140	12	0,1	-95	-90	97	102	92	100	46	56	9,32	5,68	5
146	1.26	140	12	0,1	-85	-80	95	100	90	98	44	54	9,35	5,65	6
147	1.27	140	12	0,1	-75	-70	93	98	88	96	42	52	9,38	5,62	7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
148	1.28	140	12	0,1	-65	-60	91	96	86	94	40	50	9,41	5,59	8
149	1.29	140	12	0,1	-55	-50	89	94	64	92	38	48	9,44	5,56	9
150	1.30	140	12	0,1	-45	-40	87	92	82	90	36	46	9,47	5,53	10
151	1.1	60	2	0,8	-35	-30	85	90	60	88	34	44	9,50	5,50	1
152	1.2	60	2	0,8	-25	-20	83	88	78	86	32	42	9,53	5,47	2
153	1.3	60	2	0,8	-15	-10	81	86	76	84	30	40	9,56	5,44	3
154	1.4	60	2	0,8	-5	0	79	84	74	82	28	38	9,59	5,41	4
155	1.5	60	2	0,8	5	10	77	82	72	80	26	36	9,62	5,38	5
156	1.6	60	2	0,8	15	20	75	80	70	78	24	34	9,65	5,35	6
157	1.7	60	2	0,8	25	30	73	78	68	76	22	32	9,68	5,32	7
158	1.8	60	2	0,8	35	40	71	76	66	74	20	30	9,71	5,29	8
159	1.9	60	2	0,8	45	50	69	74	64	72	18	28	9,74	5,26	9
160	1.10	60	2	0,8	55	60	67	72	62	70	16	26	9,77	5,23	10
161	1.11	60	2	0,8	65	70	65	70	60	68	14	24	9,80	5,20	1
162	1.12	60	2	0,8	75	80	63	68	58	66	12	22	9,83	5,17	2
163	1.13	60	2	0,8	85	90	61	66	56	64	10	20	9,86	5,14	3
164	1.14	60	2	0,8	95	100	59	64	54	62	12	22	9,89	5,11	4
165	1.15	60	2	0,8	105	110	57	62	52	60	14	24	9,92	5,08	5
166	1.16	60	2	0,8	115	120	55	60	50	58	16	26	9,95	5,05	6
167	1.17	60	2	0,8	125	130	53	58	48	56	18	28	9,98	5,02	7
168	1.18	60	2	0,8	135	140	51	56	46	54	20	30	10,01	4,99	8
169	1.19	60	2	0,8	145	150	49	54	44	52	22	32	10,04	4,96	9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
170	1.20	60	2	0,8	155	160	47	52	42	50	24	34	10,07	4,93	10
171	1.21	60	2	0,8	165	170	45	50	40	48	26	36	10,10	4,90	1
172	1.22	60	2	0,8	175	180	43	48	38	46	28	38	10,13	4,87	2
173	1.23	60	2	0,8	185	190	41	46	36	44	30	40	10,16	4,84	3
174	1.24	60	2	0,8	195	200	39	44	34	42	32	42	10,19	4,81	4
175	1.25	60	2	0,8	205	210	37	42	32	40	34	44	10,22	4,78	5
176	1.26	60	2	0,8	215	220	35	40	30	38	36	46	10,25	4,75	6
177	1.27	60	2	0,8	225	230	33	38	28	36	38	48	10,28	4,72	7
178	1.28	60	2	0,8	235	240	31	36	26	34	40	50	10,31	4,69	8
179	1.29	60	2	0,8	245	250	29	34	24	32	42	52	10,34	4,66	9
180	1.30	60	2	0,8	255	260	27	32	22	30	44	54	10,37	4,63	10

Номер ВАХ ИД	Напряжение U, В														
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
	Ток I, А														
1	0	0,18	0,34	0,51	0,67	0,82	0,97	1,10	1,21	1,32	1,41	1,47	1,51	1,56	1,56
2	0	0,04	0,12	0,23	0,36	0,49	0,65	0,68	1,00	1,19	1,40	1,61	1,84	2,07	2,32
3	0	0,6	0,9	1,16	1,14	1,56	1,75	1,92	2,08	2,23	2,24	2,51	2,66	2,78	2,90
4	0	0,07	0,15	0,22	0,30	0,39	0,48	0,58	0,69	0,81	0,95	1,11	1,31	1,57	1,90
5	0	0,63	0,94	1,23	1,42	1,55	1,65	1,72	1,77	1,82	1,86	1,89	1,91	1,93	1,95
6	0	0,05	0,1	0,16	0,22	0,29	0,36	0,47	0,74	0,9	1,11	1,36	1,91	1,67	2,05
7	0	0,23	0,45	0,67	0,87	1,06	1,23	1,39	1,63	1,68	1,75	1,84	1,92	1,98	2,04
8	0	0,02	0,05	0,09	0,14	0,22	0,3	0,4	0,53	0,69	0,89	1,15	1,45	1,83	2,28
9	0	0,02	0,10	0,16	0,22	0,28	0,36	0,44	0,54	0,66	0,81	1,02	1,34	1,87	3,01
10	0	0,3	0,58	0,84	1,08	1,29	1,46	1,62	1,75	1,87	1,96	2,05	2,13	2,19	2,25



Задание 1 предусматривает приближенные расчёты, проведённые в соответствии с первым допущением (нелинейная цепь постоянного тока) и в соответствии со вторым допущением (линейная цепь периодического несинусоидального тока).

1.1. Учитывая, что для заданной цепи выполняются условия  $E \gg E_m$ ,  $E \gg I_m Z$ , где  $Z$  — полное сопротивление ветви, параллельной источнику тока, рассчитать установившийся режим в нелинейной цепи на постоянном токе. С этой целью:

- построить схему цепи на постоянном токе;
- при заданных параметрах элементов схемы определить на вольт-амперной характеристике нелинейного двухполюсника положение рабочей точки;
- изменяя величины сопротивлений в цепи, добиться, чтобы рабочая точка находилась в месте максимального изгиба вольт-амперной характеристики (в необходимых случаях наряду с изменением величин сопротивлений в цепи допускается изменять напряжение источника постоянной ЭДС);

— для схемы с уточнёнными параметрами элементов рассчитать токи в ветвях и напряжения на пассивных элементах, проверить правильность расчёта, записав законы Кирхгофа и составив баланс мощностей (с записью расчётных выражений и подстановкой числовых данных);

- провести линеаризацию вольт-амперной характеристики нелинейного двухполюсника в уточнённой рабочей точке, определив статическое и дифференциальное сопротивления.

1.2. Рассчитать установившийся режим в линеаризованной электрической цепи с уточнёнными значениями параметров пассивных элементов и с учетом всех источников энергии. С этой целью:

- построить схему линеаризованной электрической цепи;
- определить составляющие токов в ветвях и напряжений на пассивных элементах, обусловленные источниками постоянной ЭДС;
- исключив из схемы источники постоянной ЭДС, записать уравнения для цепи в комплексной форме по методам контурных токов и узловых напряжений (с подстановкой числовых данных);
- определить на компьютере составляющие токов в ветвях и напряжений на пассивных элементах, обусловленные источниками синусоидальных ЭДС и тока, проверить правильность расчёта,

составив баланс мощностей (с записью расчетных соотношений и подстановкой числовых данных);

— для контура, содержащего ветвь с источником синусоидальной ЭДС и максимально возможное число ветвей с реактивными элементами, построить векторную потенциальную диаграмму, совмещенную с векторной диаграммой токов;

— записать мгновенные значения токов в ветвях и напряжений на пассивных элементах линейаризованной цепи с учетом действия всех источников энергии;

— построить графики изменения мгновенных значений тока и напряжений в линейаризованной цепи для нелинейного двухполюсника (с учетом его линейризации) и одного из реактивных элементов.

## **Задача 2. Расчет переходного режима**

2.1. Учитывая, что в результате коммутации схема заданной электрической цепи разделяется на две независимые части, рассчитать переходный процесс в части схемы с источником постоянной ЭДС при условии линейризации нелинейного двухполюсника. С этой целью:

— построить схему для исследуемой части электрической цепи;

— из расчета установившегося режима в исходной цепи определить независимые начальные условия;

— вычислить ток в индуктивности и напряжение на емкости (по указанию преподавателя могут определяться другие токи и напряжения);

— дать характеристику переходного процесса в цепи и определить его длительность;

— проверить правильность расчета переходного процесса на компьютере;

— по результатам расчетов, выполненных на компьютере и вручную, построить графики найденных функций до и после коммутации (в одной системе координат для каждой функции);

— сравнить результаты расчетов переходного процесса в цепи, полученные на компьютере и вручную;

— рассчитать остальные токи и напряжения в цепи на компьютере.

- 2.2. Рассчитать переходный процесс в части задаваемой цепи с источниками синусоидальных ЭДС и тока. С этой целью:**
- построить схему для исследуемой части электрической цепи;
  - из расчета установившегося режима в исходной цепи определить независимые начальные условия;
  - рассчитать начальные значения остальных токов и напряжений в исследуемой части электрической цепи;
  - дать характеристику переходного процесса в цепи и определить его длительности;
  - записать уравнения для исследования переходного процесса по методу пространства состояний;
  - рассчитать заданные преподавателем токи и напряжения в цепи на компьютере;
  - построить графики найденных функций до и после коммутации (в одной системе координат для каждой функции).

## **2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К РАСЧЁТУ НЕЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ**

Все электрические схемы изображаются в соответствии с ЕСКД. Допускается изображение схем на компьютере с помощью любого графического редактора при условии соблюдения размеров, указанных в стандарте. На схемах проставляются номера узлов и условные положительные направления токов.

Рекомендуется:

- базисному узлу (узлу с условно нулевым потенциалом) присвоить номер "нуль";
- условные положительные направления токов в ветвях с источниками ЭДС задать совпадающими с направлением ЭДС;
- условное положительное направление тока в ветви, параллельной источнику тока, задать в противоположном (относительно общего узла) направлении по сравнению с током источника.

Методические указания проиллюстрированы на примере анализа электрической цепи, схема которой с выбранными условно положительными направлениями токов и пронумерованными узлами приведена на рис. 2.1.

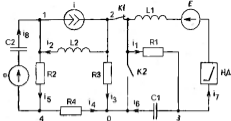


Рис. 2.1

Схема имеет следующие числовые данные:

$E = 40$  В,  $E_m = 2$  В,  $I_m = 0,1$  А,  $\psi_2 = -30^\circ$ ,  $\psi_1 = -0^\circ$ ,  $R_1 = 75$  Ом,  $R_2 = 100$  Ом,  $R_3 = 120$  Ом,  $R_4 = 90$  Ом,  $L_1 = 60$  мГн,  $L_2 = 52$  мГн,  $C_1 = 4$  мкФ,  $C_2 = 3,2$  мкФ.

Вольт-амперная характеристика нелинейного двухполюсника соответствует следующим значениям токов и напряжений:

$U, \text{В}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120	140	160
$I, \text{А}$	0	0,94	1,23	1,42	1,55	1,65	1,72	1,77	1,82	1,86	1,89	1,91	1,93	1,95

## 2.1. Расчёт установившегося режима в нелинейной электрической цепи

### 2.1.1. Расчёт установившегося режима в нелинейной цепи на постоянном токе

Составляется докоммутационная схема на постоянном токе. Она получается из исходной схемы (рис. 2.1) путём закорачивания источника синусоидальной ЭДС и индуктивностей, удаления источника синусоидального тока и ёмкостей. В схеме остаётся только источник постоянной ЭДС, линейные сопротивления и нели-

нейный двухполюсник. Например, на схеме на рис. 2.1 получается схема, представленная на рис. 2.2.



Рис. 2.2

Если цепь на постоянном токе оказывается разветвлённой, то на основании теоремы об эквивалентном источнике [1] её линейная часть заменяется источником ЭДС и линейным сопротивлением. Последние вместе с нелинейным двухполюсником образуют последовательный контур, аналогичный представленному на рис. 2.2.

Расчёт цепи рис. 2.2 целесообразно осуществить методом пересечений [5].

На рис. 2.3 изображено:

- кривая 1 — вольт-амперная характеристика нелинейного двухполюсника;
- прямая 2 — линия нагрузки, проведённая через точки

$$U_x = E = 40 \text{ В},$$

$$I_n = \frac{E}{R_1} = 0,526 \text{ А},$$

где  $U_x$  — напряжение холостого хода;  $I_n$  — ток короткого замыкания.

Пересечение кривой 1 и прямой 2 даёт значение тока

$$I_{HD} = 0,47 \text{ А}$$

и напряжение

$$U_{HD} = 4,8 \text{ В}.$$

Таким образом, на постоянном токе

$$I_7 = I_1 = 0,47 \text{ А},$$

$$U_{R1} = I_1 R_1 = 35,25 \text{ В}.$$

Перемещение рабочей точки по вольт-амперной характеристике нелинейного двухполюсника достигается изменением величины  $I_n$ . В том случае, если напряжение в рабочей точке превышает величину  $U_x$  или равно ей, необходимо увеличивать последнюю.

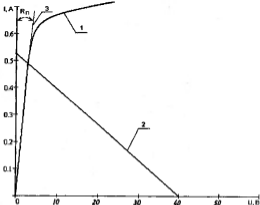


Рис. 2.3

Имея выражения для определения  $U_x$  и  $I_x$ , подобные приведённым выше, путём изменения одного или нескольких сопротивлений, а при необходимости — ЭДС источника, получают требуемое положение рабочей точки.

После определения положения рабочей точки и, следовательно, тока и напряжения на величинном двухполюснике все остальные токи и напряжения в цепи последовательно определяются с помощью закона Ома и первого закона Кирхгофа.

Баланс мощностей в цепи постоянного тока выражается равенством

$$P_{\text{ист}} = P_{\text{потр}}$$

где  $P_{\text{ист}}$  — мощность, отдаваемая в цепь источниками энергии;  $P_{\text{потр}}$  — мощность, потребляемая пассивными элементами цепи. В исследуемой цепи

$$P_{\text{вст}} = EI_7 = 13,3 \text{ Вт.}$$

$$P_{\text{потр}} = U_{R1} I_1 + U_{\text{нд}} I_7 = 35,3 \cdot 0,47 + 4,8 \cdot 0,47 = 18,84 \text{ Вт.}$$

При практических расчётах несовпадение  $P_{\text{вст}}$  и  $P_{\text{потр}}$  не должно превышать 5 %.

Величины статического и дифференциального сопротивлений определяются в рабочей точке по формулам

$$R_{\text{ст}} = \frac{U_{\text{нд}}}{I_{\text{нд}}},$$

$$R_{\text{диф}} = \frac{dU_{\text{нд}}}{dI_{\text{нд}}}.$$

причём в последнем случае производная на практике замещается отношением конечных приращений.

Выбор варианта линеаризации вольт-амперной характеристики величинного двухполюсника определяется видом характеристики и диапазоном изменений рабочих токов и напряжений. Если характеристика величинного двухполюсника проходит через начало координат и на всём диапазоне изменения токов и напряжений близка к линейной, линеаризация заключается в замене величинного двухполюсника его статическим сопротивлением. Если характеристика двухполюсника существенно отличается от линейной, а диапазон изменения рабочих токов и напряжений достаточно мал, целесообразно использовать для линеаризации метод компенсации [6]. Согласно этому методу, величинный двухполюсник в рабочей точке и некоторой её окрестности заменяется активным линейным двухполюсником в составе сопротивления, величина которого равна  $R_{\text{диф}}$ , и источнику ЭДС, равной

$$E_0 = I_{\text{нд}} R_{\text{диф}} - U_{\text{нд}},$$

при этом направление ЭДС совпадает с направлением тока  $I_{\text{нд}}$ .

В рассматриваемом примере допустимо линеаризацию нелинейного двухполюсника осуществить заменой нелинейной вольт-амперной характеристики прямой, проходящей через рабочую

точку и начало координат. Сопротивление дивергированного двух-полюсника находится по формуле

$$R_n = R_{св} = \frac{U_{вх}}{I_{вх}}.$$

Для рис. 2.3 имеем  $R_n = 10 \text{ Ом}$ .

### 2.1.2. Расчёт установившегося режима в линеаризованной цепи под действием всех источников энергии

Поскольку цепь рис. 2.1 после линеаризации представляет собой линейную цепь периодического нелинейного тона, расчёт постоянной и синусоидальной составляющих токов и напряжений в ней выполняются отдельно с последующим суммированием этих составляющих на основе принципа наложения.

Расчёт цепи под действием источников постоянной ЭДС проводится любым известным методом расчёта цепей постоянного тока [1]. Если результаты расчёта оказываются близки к полученным в п. 1.1 задания, это говорит о правильности самих расчётов и проведённой линеаризации.

В рамках этого же расчёта должны быть определены постоянные составляющие токов в индуктивностях и напряжений на емкостях. Для цепи на рис. 2.2

$$I_{L1} = I_7 = 0,47 \text{ А},$$

$$I_{L2} = I_2 = 0.$$

$$U_{C1} = U_6 = -U_{R1} = -I_1 \cdot R_1 = -35,25 \text{ В},$$

$$U_{C2} = U_8 = 0.$$

Для определения составляющих токов и напряжений в цепи под действием источников синусоидальных ЭДС и тока предлагается использовать методы контурных токов и узловых напряжений в комплексной форме [1]. При этом численный расчёт выполняется на компьютере на основе уравнений метода узловых напряжений.



Построение векторной потенциальной диаграммы начинается с выбора точки контура, потенциал которой условно принимается равным нулю (эта точка помещается в начало координат). В качестве такой точки обычно принимают условно отрицательный зажим источника синусоидальной ЭДС. Затем, по мере обхода контура, строят векторы, соответствующие комплексным напряжениям на элементах с учётом правил сложения и вычитания векторов (при обходе ветви по направлению тока вектор падения напряжения необходимо вычитать, при обходе против направления тока — прибавлять). При таком построении после полного обхода контура диаграмма должна стать замкнутой.

Построение векторной диаграммы токов сводится к построению комплексных токов, входящих в контур, в виде векторов, исходящих из начала координат.

Запись в мгновенной форме токов и напряжений линейаризованной цепи с учётом действия всех источников энергии производится сложением постоянных и синусоидальных составляющих, рассчитанных при выполнении п. 1.2 задания. Для этого синусоидальные составляющие, рассчитанные на компьютере в комплексной форме, должны быть предварительно преобразованы в мгновенную форму. При сложении необходимо также контролировать совпадение направлений отдельных составляющих с выбранным положительным направлением полной величины.

Графики изменения мгновенных значений тока и напряжения для каждого из элементов строятся по зависимостям, полученным в результате сложения постоянных и синусоидальных составляющих, и должны охватывать не менее двух периодов колебания последних. Правильность расчёта соответствующих функций и построения графиков можно проконтролировать по фазовому сдвигу между напряжением и током в рассматриваемом элементе.

## 2.2. Расчёт переходного режима в линейаризованной электрической цепи

Все электрические схемы, которые представлены на рис. 1.1 — 1.30, в результате коммутации разделяются на две независимые части. В одной из них остаётся источник постоянной ЭДС и нелинейный двухполюсник, в другой — источники синусоидальных ЭДС и тока.

### 2.2.1. Исследование переходного процесса в линейной цепи с источником постоянной ЭДС

Расчёт переходного процесса всегда начинается с определения независимых начальных условий. Для их расчёта из множества найденных в докоммутиционной цепи (п. 1.2 задания) токов и напряжений выбираются те, которые соответствуют току в индуктивности и напряжению на ёмкости исследуемой части цепи. Подстановка  $t = 0$  в эти функции времени, с учётом законов коммутации, и даёт искомые независимые начальные условия.

Расчёт начальных значений остальных токов и напряжений выполняется по правилам определения зависимых начальных условий, т.е. из системы уравнений, записанных для исследуемой цепи на основе законов Кирхгофа (возможно также использование уравнений метода контурных токов) для момента времени  $t = 0$ .

Для нахождения законов изменения во времени токов и напряжений исследуемой цепи целесообразно использовать классический или операторный метод [1].

Расчёт классическим методом проводится стандартным образом как для цепи второго порядка. В зависимости от типа искомого функций, для определения постоянных интегрирования может оказаться недостаточно тех зависимых начальных условий, которые были найдены ранее. В этом случае дополнительно записывается и решается система из продифференцированных по времени уравнений, сформулированных по законам Кирхгофа (или по методу контурных токов).

Расчёт исследуемой цепи операторным методом не имеет особенностей и также проводится стандартным образом.

Известно, что в цепях второго порядка, в зависимости от соотношения параметров пассивных элементов, возможны возникновение трёх типов переходных процессов — апериодического, критического и колебательного. Оценка характера переходного процесса выполняется по виду корней соответствующего характеристического уравнения (при расчёте классическим методом) или по виду нулей полинома, стоящего в знаменателе операторного изображения искомой функции (при расчёте операторным методом).

Длительность переходного процесса в цепях второго порядка, в зависимости от его характера, определяется следующим образом:

— для апериодического типа

$$t_{\text{ин}} = \frac{(4 \dots 5)}{|\rho|_{\text{min}}}$$

где  $|\rho|_{\text{min}}$  — минимальный по абсолютной величине корень характеристического уравнения;

— для критического и колебательного типа

$$t_{\text{ин}} = \frac{(4 \dots 5)}{\delta}$$

где  $\delta$  — коэффициент затухания переходного процесса.

График каждой искомой функции для докоммутиационного и послекоммутиационного режимов строится на одних и тех же осях. Аналитическое выражение для тока или напряжения до коммутации берётся из расчёта по заданию 1.2. На графике необходимо изобразить измененные функции не менее чем за один период установившегося (докоммутиационного) режима. Выражение для тока или напряжения после коммутации есть результат аналитического расчёта переходного процесса. Измененные функции отображаются на графике в пределах длительности этого процесса.

На тех же осях изображается график послекоммутиационного изменения тока или напряжения, рассчитанного на компьютере.

### **2.2.2. Расчёт переходного процесса в цепи с источниками синусоидальных ЭДС и тока**

Расчёт начальных условий, определение характера переходного процесса и его длительности осуществляются в соответствии с рекомендациями, сформулированными в п. 2.2.1.

Метод пространства состояний [2] является основным методом, предназначенным для расчёта переходных процессов при использовании вычислительной техники. Уравнения состояния, представляющие собой систему дифференциальных уравнений первого порядка в форме Коши, позволяют определить так называемые переменные состояния, которые являются токами в индуктивностях и напряжениями на емкостях исследуемой цепи. Выходные уравнения, являющиеся алгебраическими, позволяют определить выходные переменные, которыми могут быть любые токи и напряжения, не вошедшие в состав переменных состояния.

Уравнения состояния и выходные уравнения формируются на основании системы уравнений Кирхгофа, записанных для послекоммутационной цепи.

График каждой искомой функции, как и в п. 2.1 задания, строится для режимов до и после коммутации на одних осях. Аналитическое выражение для первого берется из расчета по п. 1.2 задания. Второй режим отображается на графике по результатам расчета на компьютере в пределах длительности переходного процесса, дополненной периодом установившегося режима.

### 3. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К РАСЧЕТУ ЦЕПИ НА ЭВМ

#### 3.1. Расчет токов и напряжений в докоммутационной цепи в синусоидальном режиме

Расчетная схема отличается от исходной схемы, представленной в задании, отсутствием источника постоянной ЭДС и заменой величинного двухполюсника линейным сопротивлением  $R_n$ .

Так как расчет на ЭВМ осуществляется по методу узловых потенциалов, то целесообразно запрограммировать расчет проводимостей ветвей. Удобно номер комплексной проводимости сделать совпадающим с номером ветви. Для схемы на рис. 2.1 имеем

$$\underline{Y}_1 = \frac{1}{R_1}, \quad \underline{Y}_2 = \frac{1}{j\omega L_2}, \quad \underline{Y}_3 = \frac{1}{R_3}, \quad \underline{Y}_4 = \frac{1}{R_4}, \quad \underline{Y}_5 = \frac{1}{R_2}, \\ \underline{Y}_6 = j\omega C_1, \quad \underline{Y}_7 = \frac{1}{R_n + j\omega L_1}, \quad \underline{Y}_8 = j\omega C_2.$$

В матричной форме уравнение по методу узловых потенциалов имеет вид

$$\underline{Y} \cdot \underline{V} = \underline{J},$$

где  $\underline{Y}$  — матрица размерности  $q \times q$  ( $q$  — число узлов, не считая нулевого);  $\underline{V}$  — вектор, элементами которого являются неизвестные потенциалы узлов  $\underline{V}_k$ ,  $k = 1, \dots, q$ ;  $\underline{J}$  — вектор, элементами которого являются алгебраические суммы токов источников энергии, подсоединенных к соответствующим узлам.

На главной диагонали матрицы  $\underline{Y}$  представляются суммы проводимостей ветвей, подключенных к узлам, а остальные элементы

представляют собой суммы проводимостей ветвей между узлами, взятые с отрицательным знаком. Например, элемент  $\underline{Y}_{23} = \underline{Y}_{32}$  равен сумме проводимостей ветвей между узлами 2 и 3 со знаком "минус".

Для схемы на рис. 2.1 имеем

$$\underline{Y} = \begin{pmatrix} \underline{Y}_2 + \underline{Y}_5 + \underline{Y}_8 & -\underline{Y}_2 & 0 & -\underline{Y}_5 - \underline{Y}_8 \\ -\underline{Y}_2 & \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3 + \underline{Y}_7 & -\underline{Y}_1 - \underline{Y}_7 & 0 \\ 0 & -\underline{Y}_3 - \underline{Y}_7 & \underline{Y}_1 + \underline{Y}_6 + \underline{Y}_7 & 0 \\ -\underline{Y}_5 - \underline{Y}_8 & 0 & 0 & \underline{Y}_4 + \underline{Y}_5 + \underline{Y}_8 \end{pmatrix},$$

$$\underline{J} = \begin{pmatrix} \underline{E} \cdot \underline{Y}_8 \\ \underline{I} \\ 0 \\ -\underline{E} \cdot \underline{Y}_8 \end{pmatrix}.$$

Решение матричного уравнения осуществляется после ввода матрицы  $\underline{Y}$  и вектора  $\underline{J}$  с помощью оператора [4]:

$$\underline{V} = \text{Isolve}(\underline{Y}, \underline{J}), \quad \text{или} \quad \underline{V} = \underline{Y}^{-1} \cdot \underline{J}.$$

По известным потенциалам узлов рассчитываются токи в ветвях. Для схемы на рис. 2.1 имеем

$$\underline{I}_1 = (\underline{V}_2 - \underline{V}_3) \cdot \underline{Y}_1,$$

$$\underline{I}_2 = (\underline{V}_2 - \underline{V}_1) \cdot \underline{Y}_2,$$

$$\underline{I}_3 = \underline{V}_2 \cdot \underline{Y}_3,$$

$$\underline{I}_4 = \underline{V}_4 \cdot \underline{Y}_4,$$

$$\underline{I}_5 = (\underline{V}_5 - \underline{V}_4) \cdot \underline{Y}_5,$$

$$\underline{I}_6 = \underline{V}_3 \cdot \underline{Y}_6,$$

$$\underline{I}_7 = (\underline{V}_3 - \underline{V}_2) \cdot \underline{Y}_7,$$

$$\underline{I}_8 = (\underline{V}_4 + \underline{E} - \underline{V}_1) \cdot \underline{Y}_8.$$

Целесообразно в программе предусмотреть расчет действующих и амплитудных значений, а также начальных фаз токов. На основании этих данных формируются синусоидальные составляющие мгновенных значений токов в ветвях.

Правильность расчета токов проверяется составлением уравнений по первому закону Кирхгофа в комплексной форме для всех узлов:

$$\underline{I8} - \underline{I5} + \underline{I2} - \underline{I} = 0,$$

$$\underline{I} - \underline{I2} - \underline{I3} - \underline{I1} + \underline{I7} = 0,$$

$$\underline{I1} - \underline{I7} - \underline{I6} = 0,$$

$$\underline{I5} - \underline{I8} - \underline{I4} = 0.$$

Вторая проверка правильности расчета состоит в составлении баланса мощностей на переменном токе. Программируется расчет мощностей, отдаваемых источниками энергии:

$$\underline{S} = \underline{S}_e + \underline{S}_1,$$

$$\underline{S}_e = \underline{E} \cdot \underline{I}_e^*,$$

$$\underline{S}_1 = \underline{U}_1 \cdot \underline{I}^*,$$

где  $\underline{S}_e$  — комплексная мощность, отдаваемая источником ЭДС;

$\underline{S}_1$  — комплексная мощность, отдаваемая источником тока;

$\underline{I}_e^*$  — комплексно-сопряженное значение тока, протекающего по источнику ЭДС (предполагается, что  $\underline{E}$  и  $\underline{I}_e$  имеют одинаковые условно положительные направления);

$\underline{U}_1$  — напряжение на зажимах источника тока;

$\underline{I}^*$  — комплексно-сопряженное значение тока источника тока (предполагается, что условно положительные направления  $\underline{I}$  и  $\underline{U}_1$  противоположны относительно их общего узла).

Мощность, потребляемая пассивными элементами, находится по формулам

$$P = \sum I_k^2 R_k, \quad k = 1, \dots, n,$$

где  $I_k$  — действительное значение тока в сопротивлении  $R_k$ ;  $n$  — число активных сопротивлений в цепи,

$$Q = \sum I_k^2 X_{Lk} - \sum I_j^2 X_{Cj}, \quad k = 1, \dots, m, \quad j = 1, \dots, l,$$

где  $I_k, I_l$  — действующие значения токов в индуктивности  $L_k$  и емкости  $C_l$  соответственно;  $m$  — число индуктивностей,  $l$  — число емкостей.

При правильном расчете цепи соблюдается равенство:

$$\operatorname{Re} \underline{S} = P, \quad \operatorname{Im} \underline{S} = Q.$$

Далее необходимо рассчитать все напряжения на пассивных элементах в комплексной форме по формулам

$$\underline{U}_k = \underline{I}_k / \underline{Y}_k, \quad k = 1, \dots, p,$$

где  $p$  — число ветвей.

По аналогии с расчетом токов в программе целесообразно предусмотреть расчет действующих и амплитудных значений напряжений и их начальных фаз. По этим данным формируются синусоидальные составляющие мгновенных значений напряжений на пассивных элементах цепи.

Ниже приводится расписка программы расчета докоммутиционного режима при взаимодействии источников синусоидальных ЭДС и тока.

### Расчет установившегося режима до коммутации при взаимодействии источников синусоидальных ЭДС и тока

Расчет ведется в комплексных действующих значениях токов и напряжений.

#### Ввод исходных данных

$$f := 400 \text{ Hz} \quad \omega := 2512 \quad i := \sqrt{-1}$$

$$E_m := 2 \quad \psi_0 := \frac{\pi}{6}$$

$$E := \frac{E_m}{\sqrt{2}} \cdot (\cos(\psi_0) + \sin(\psi_0) \cdot i) \quad E = 1.225 + 0.707j$$

$$\operatorname{Im} := 0.1 \quad \psi_i := 0$$

$$I := \frac{Im}{\sqrt{2}} \cdot (\cos(\varphi_i) + \sin(\varphi_i) \cdot i)$$

$$I = 0.071$$

$$R1 := 75$$

$$R2 := 100$$

$$R3 := 120$$

$$R4 := 90$$

$$Rn := 10$$

$$L1 := 48 \cdot 10^{-3}$$

$$L2 := 20 \cdot 10^{-3}$$

$$C1 := 4 \cdot 10^{-6}$$

$$C2 := 6.66 \cdot 10^{-6}$$

### Расчет комплексных проводимостей ветвей

Предварительно нумеруются все ветви схемы в произвольном порядке.

$$Y1 := \frac{1}{R1}$$

$$Y5 := \frac{1}{R2}$$

$$Y4 := \frac{1}{R4}$$

$$Y6 := i \cdot \omega \cdot C1$$

$$Y2 := \frac{1}{\omega \cdot L2 \cdot i}$$

$$Y7 := \frac{1}{\omega \cdot L1 \cdot i + Rn}$$

$$Y8 := \omega \cdot C2 \cdot i$$

$$Y3 := \frac{1}{R3}$$

$$Y1 = 0.013$$

$$Y3 = 8.333 \times 10^{-3}$$

$$Y2 = -0.02j$$

$$Y4 = 0.011$$

$$Y5 = 0.01$$

$$Y6 = 0.01j$$

$$Y7 = 6.831 \times 10^{-4} - 8.217j \times 10^{-3}$$

$$Y8 = 0.017j$$

$$\text{ORIGIN} := 1$$

### Определение узловых потенциалов

Составляем матрицу проводимостей по методу узловых потенциалов.

$$Y := \begin{pmatrix} Y2 + Y5 + Y8 & -Y2 & 0 & -Y5 - Y8 \\ -Y2 & Y1 + Y2 + Y3 + Y7 & -Y1 - Y7 & 0 \\ 0 & -Y1 - Y7 & Y1 + Y6 + Y7 & 0 \\ -Y5 - Y8 & 0 & 0 & Y4 + Y5 + Y8 \end{pmatrix}$$



$$Y = \begin{pmatrix} 0.01 - 3.17j \times 10^{-3} & 0.02j & 0 & -0.01 - 0.017j \\ 0.02j & 0.022 - 0.028j & -0.014 + 8.237j \times 10^{-3} & 0 \\ 0 & -0.014 + 8.237j \times 10^{-3} & 0.014 + 1.811j \times 10^{-3} & 0 \\ -0.01 - 0.017j & 0 & 0 & 0.021 + 0.017j \end{pmatrix}$$

$$J = \begin{pmatrix} E \cdot YB - I \\ I \\ 0 \\ -E \cdot YB \end{pmatrix} \quad J = \begin{pmatrix} -0.003 + 0.02j \\ 0.071 \\ 0 \\ 0.012 - 0.02j \end{pmatrix}$$

Решение матричного уравнения

$$V := \text{solve}(Y, J)$$

$$V = \begin{pmatrix} -0.621 - 2.21j \\ 0.788 + 1.352j \\ 1.67 + 0.673j \\ 0.018 - 2.524j \end{pmatrix}$$

Расчет тока в ветвях

Нумерация токов соответствует нумерации ветвей схемы.

$$\begin{array}{lll} I_1 = (V_2 - V_3) \cdot Y1 & I_1 = -0.012 + 9.05j \times 10^{-3} & |I_1| = 0.015 \\ I_2 = (V_2 - V_1) \cdot Y2 & I_2 = 0.071 - 0.028j & |I_2| = 0.076 \\ I_3 = V_2 \cdot Y3 & I_3 = 6.366 \times 10^{-3} + 0.011j & |I_3| = 0.013 \\ I_4 = V_4 \cdot Y4 & I_4 = 1.968 \times 10^{-4} - 0.028j & |I_4| = 0.028 \\ I_5 = (V_1 - V_4) \cdot Y5 & I_5 = -6.388 \times 10^{-3} + 1.134j \times 10^{-3} & |I_5| = 7.115 \times 10^{-3} \\ I_6 = V_3 \cdot Y6 & I_6 = -6.765 \times 10^{-3} + 0.017j & |I_6| = 0.018 \\ I_7 = (V_2 - V_3) \cdot Y7 & I_7 = 4.969 \times 10^{-3} + 7.725j \times 10^{-3} & |I_7| = 9.196 \times 10^{-3} \\ I_8 = (V_4 + E - V_1) \cdot Y8 & I_8 = -6.587 \times 10^{-3} + 0.034j & |I_8| = 0.032 \end{array}$$

$\arg(I1) = 2.485$	$I1m =  I1  \cdot \sqrt{2}$	$I1m = 0.021$
$\arg(I2) = -0.377$	$I2m =  I2  \cdot \sqrt{2}$	$I2m = 0.108$
$\arg(I3) = 1.043$	$I3m =  I3  \cdot \sqrt{2}$	$I3m = 0.048$
$\arg(I4) = -1.364$	$I4m =  I4  \cdot \sqrt{2}$	$I4m = 0.04$
$\arg(I5) = 2.685$	$I5m =  I5  \cdot \sqrt{2}$	$I5m = 0.01$
$\arg(I6) = 1.954$	$I6m =  I6  \cdot \sqrt{2}$	$I6m = 0.026$
$\arg(I7) = 0.997$	$I7m =  I7  \cdot \sqrt{2}$	$I7m = 0.043$
$\arg(I8) = 1.779$	$I8m =  I8  \cdot \sqrt{2}$	$I8m = 0.045$

### Проверка первого закона Кирхгофа

$$I8 - I5 + I2 - I1 = 0$$

$$I1 - I2 - I3 - I4 - I7 = 0$$

$$I4 + I7 - I6 = 0$$

$$I5 - I8 - I4 = 0$$

### Расчет баланса мощностей

Комплексная мощность, отдаваемая источником энергии

$$S_e := E \cdot I8 \quad S_e = 0.014 - 0.043j$$

$$S_i := (V_2 - V_1) \cdot I \quad S_i = 0.1 + 0.252j$$

$$S := S_e + S_i \quad S = 0.114 + 0.209j$$

Мощность, потребляемая пассивными элементами

$$P := (|I5|)^2 \cdot R2 + (|I4|)^2 \cdot R4 + (|I3|)^2 \cdot R3 + (|I1|)^2 \cdot R1 + (|I7|)^2 \cdot Rm$$

$$Q := (|I2|)^2 \cdot \omega \cdot L2 + (|I7|)^2 \cdot \omega \cdot L1 - (|I8|)^2 \cdot \frac{1}{\omega \cdot C2} - (|I6|)^2 \cdot \frac{1}{\omega \cdot C1}$$

$$P = 0.114$$

$$Q = 0.209$$

## Расчет падений напряжений на элементах цепи

$$U_1 = \frac{I_1}{Y_1} \quad U_1 = -0.882 + 0.679j \quad |U_1| = 1.113$$

$$U_2 = \frac{I_2}{Y_2} \quad U_2 = 1.409 + 3.562j \quad |U_2| = 3.831$$

$$U_3 = \frac{I_3}{Y_3} \quad U_3 = 0.788 + 1.352j \quad |U_3| = 1.565$$

$$U_4 = \frac{I_4}{Y_4} \quad U_4 = 0.018 - 2.524j \quad |U_4| = 2.524$$

$$U_5 = \frac{I_5}{Y_5} \quad U_5 = -0.639 + 0.313j \quad |U_5| = 0.712$$

$$U_6 = \frac{I_6}{Y_6} \quad U_6 = 1.67 + 0.673j \quad |U_6| = 1.8$$

$$U_7 = \frac{I_7}{Y_7} \quad U_7 = -0.882 + 0.679j \quad |U_7| = 1.113$$

$$U_8 = \frac{I_8}{Y_8} \quad U_8 = 1.864 + 0.394j \quad |U_8| = 1.905$$

$$\arg(U_1) = 2.485 \quad U_{1m} = |U_1| \cdot \sqrt{2} \quad U_{1m} = 1.573$$

$$\arg(U_2) = 1.194 \quad U_{2m} = |U_2| \cdot \sqrt{2} \quad U_{2m} = 5.418$$

$$\arg(U_3) = 1.043 \quad U_{3m} = |U_3| \cdot \sqrt{2} \quad U_{3m} = 2.213$$

$$\arg(U_4) = -1.564 \quad U_{4m} = |U_4| \cdot \sqrt{2} \quad U_{4m} = 3.569$$

$$\arg(U_5) = 2.685 \quad U_{5m} = |U_5| \cdot \sqrt{2} \quad U_{5m} = 1.006$$

$$\arg(U_6) = 0.383 \quad U_{6m} = |U_6| \cdot \sqrt{2} \quad U_{6m} = 2.546$$

$$\arg(U_7) = 2.485 \quad U_{7m} = |U_7| \cdot \sqrt{2} \quad U_{7m} = 1.573$$

$$\arg(U_8) = 0.208 \quad U_{8m} = |U_8| \cdot \sqrt{2} \quad U_{8m} = 2.694$$

### 3.2. Расчет переходного процесса в цепи с источником постоянной ЭДС

В исходной цепи осуществляется коммутация ключей, после которой цепь распадается на две независимые друг от друга части, в одной из которых присутствует источник постоянной ЭДС, а в

другой — источник синусоидальных ЭДС и тока. Рассмотрим методику расчета переходного процесса в цепи с нечетным постоянным ЭДС (рис. 3.1). Для расчета на ЭВМ потребуются независимые начальные условия и приблизительная длительность переходного процесса. Например, для схемы на рис. 2.1 при расчете установившегося режима с учетом действия всех источников энергии было получено



Рис. 3.1

$$i_{L1} = i_7 = 0,013 \sin (2512t - 2,144) + 0,47 \text{ A,}$$

$$i_{L2} = i_2 = 1,08 \sin (2512t - 0,377) \text{ A,}$$

$$u_{C1} = u_6 = 2,546 \sin (2512t + 0,383) - 35,25 \text{ B,}$$

$$u_{C2} = u_8 = 2,694 \sin (2512t + 0,208) \text{ B.}$$

Подстановка в эти формулы  $t = 0$ , находим независимые начальные условия

$$i_2(0) = -0,04 \text{ A,}$$

$$i_7(0) = 0,459 \text{ A,}$$

$$u_6(0) = -34,299 \text{ B,}$$

$$u_8(0) = 0,556 \text{ B.}$$

Из них образуем вектор-столбец  $x_0$ . Для нашего примера индуктивность и емкость находится в ветвях 7 и 6 соответственно, поэтому вектор начальных условий имеет вид

$$x_0 = \begin{pmatrix} i_7(0) \\ u_6(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,459 \\ -34,299 \end{pmatrix}.$$

Для оценки длительности переходного процесса необходимо найти корни характеристического уравнения. С этой целью составляется операторное сопротивление  $Z(p)$  относительно двух

любой замкнутой цепи после коммутации. Полученное выражение преобразуется к дробно-рациональной функции

$$Z(p) = \frac{M(p)}{N(p)} = \frac{a_0 p^2 + a_1 p + a_2}{b_0 p^2 + b_1 p + b_2},$$

где  $a_k, b_k, k = 0, 1, 2$  — постоянные коэффициенты, зависящие от параметров пассивных элементов цепи.

Далее составляется вектор  $\mathbf{H}$  вида

$$\mathbf{H} = [a_2 \ a_1 \ a_0]^T,$$

и с помощью оператора

$$\text{polyroots}(\mathbf{H})$$

находятся корни характеристического уравнения. Длительность переходного процесса  $t_{\text{ин}}$  определяется по приближенной формуле

$$t_{\text{ин}} = 4 / |\text{Real } p_k|,$$

где  $p_k$  — корень характеристического уравнения с меньшей (по модулю) вещественной частью.

Для программирования переходного процесса в *MathCAD* [4] целесообразно составить уравнения по методу пространства состояний [2], т.е. записать уравнения Кирхгофа в форме

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{V},$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X} + \mathbf{D}\mathbf{V},$$

где  $\mathbf{X}$  — вектор, содержащий искомые ток в индуктивности и напряжение на емкости,

$$\mathbf{X} = [i_L \ u_C]^T,$$

$\mathbf{V}$  — вектор источников энергии,

$$\mathbf{V} = [e \ i]^T.$$

Матрицы  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{D}$  находятся из уравнений Кирхгофа, составленных для мгновенных значений токов и напряжений.

Из уравнений состояния формируется вектор-столбец  $D1$  вида

$$D1 = AX + BV = \begin{pmatrix} a_{11} X_1 + a_{12} X_2 + b_{11} e + b_{12} i \\ a_{21} X_1 + a_{22} X_2 + b_{21} e + b_{22} i \end{pmatrix}.$$

Расчет переходного процесса осуществляется с помощью оператора

$$Z = \text{rkfixed}(x0, t_0, t_{\text{fin}}, N, D1),$$

$t_0$  — начальный момент переходного процесса ( $t_0 = 0$ );  $N$  — число точек, в которых рассчитывается переходный процесс (обычно достаточно положить  $N = 150 \dots 200$ );  $Z$  — таблица, число строк которой равно  $N$ , в первом столбце расположены значения времени  $t$ , во втором — значения первого элемента искомого вектора  $X_1 = i_\gamma$ , в третьем столбце — значения второго элемента искомого вектора  $X_2 = u_\xi$ .

Для вывода элементов этой таблицы на график необходимо обрабатывать ранжированные векторы [4]

$$t = Z^{<1>}, \quad i_\gamma = Z^{<2>}, \quad u_\xi = Z^{<3>}.$$

Далее обычным способом строятся графики  $i_\gamma(t)$ ,  $u_\xi(t)$ . При этом построение должно быть осуществлено в одной системе координат с графиками, выполненными по результатам расчета вручную.

Расчет вектора  $Y$  начинается с составления матриц  $C$  и  $D$ , которые также находятся из уравнений Кирхгофа. Элементами этого вектора являются токи и напряжения, входящие в вектор  $X$ , которые требуется вычислить в соответствии с заданием.

Решение алгебраического матричного уравнения

$$Y = CX + DV$$

можно осуществить различными способами. Ниже приведем один из вариантов. Рассчитаем таблицу  $W$ , содержащую  $N$  строк и  $n + 1$  столбцов, где  $n$  — число элементов вектора  $Y$ . Расположим для примера в первом столбце ток  $i_0$ , во втором —  $i_1$ , в третьем —  $u_L$ , в четвертом —  $i$ .

Таблица  $W$  образуется с помощью подпрограммы

$$i = Z^{(2)}$$

$$u_c = Z^{(3)}$$

$$t = Z^{(4)}$$

$$k = 1..N$$

$$W_{k,1} = C_{11} i_k + C_{12} u_{C,k} + D_1 E$$

$$W_{k,2} = C_{21} i_k + C_{22} u_{C,k} + D_2 E$$

$$W_{k,3} = C_{31} i_k + C_{32} u_{C,k} + D_3 E$$

$$W_{k,4} = t_k.$$

Ниже приведена распечатка программы расчета переходного процесса в цепи с источником постоянной ЭДС.

## РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ЦЕПИ С ИСТОЧНИКОМ ПОСТОЯННОЙ ЭДС

### Независимые начальные условия

$$i20 := 0.168 \cdot \sin(-0.377) \quad i20 = -0.04$$

$$i70 := 0.013 \cdot \sin(-2.144) + 0.47 \quad i70 = 0.459$$

$$u60 := 2.546 \cdot \sin(0.383) - 35.25 \quad u60 = -34.299$$

$$u80 := 2.694 \cdot \sin(0.208) \quad u80 = 0.556$$

$$x0 := \begin{pmatrix} 0.459 \\ -34.299 \end{pmatrix} \quad \text{— вектор начальных условий.}$$

### Расчет длительности переходного процесса

Составляется характеристическое уравнение, находят его корни и постоянная времени как величина, обратная вещественной части корня, ближайшего к мнимой оси.

$$H := \begin{pmatrix} R1 + Rn \\ LI + Rn \cdot R1 - C1 \\ R1 - C1 - LI \end{pmatrix}$$

$$\text{polyroots}(H) = \begin{pmatrix} -1.771 \times 10^3 - 1.663j \times 10^3 \\ -1.771 \times 10^3 + 1.663j \times 10^3 \end{pmatrix}$$

$$m := 4 - \frac{1}{1.771 \cdot 10^3}$$

$$m = 2.259 \times 10^{-3}$$

Составляются уравнения Кирхгофа для мгновенных значений токов и напряжений. Они преобразуются по методу пространства состояний в матричное уравнение  $dX/dt = AX + BV$ , из которого находится вектор-столбец  $D1(t, X) = AX + BV$ .

$$D1(t, X) := \begin{pmatrix} \frac{-Rn}{LI} \cdot X_1 + \frac{1}{LI} \cdot X_2 + \frac{40}{LI} \\ \frac{1}{-C1} \cdot X_1 - \frac{1}{R1 - C1} \cdot X_2 \end{pmatrix}$$

$$Z1 := \text{rfixed}(x0, 0, 0.005, 300, D1)$$

	1	2	3
1	0	0.459	-34.299
2	1 · 10 <sup>-5</sup>	0.459	-34.303
3	2 · 10 <sup>-5</sup>	0.459	-34.308
4	3 · 10 <sup>-5</sup>	0.46	-34.313
5	4 · 10 <sup>-5</sup>	0.46	-34.319
6	5 · 10 <sup>-5</sup>	0.46	-34.325
7	6 · 10 <sup>-5</sup>	0.46	-34.331
8	7 · 10 <sup>-5</sup>	0.461	-34.338
9	8 · 10 <sup>-5</sup>	0.461	-34.345
10	9 · 10 <sup>-5</sup>	0.461	-34.352
11	1 · 10 <sup>-4</sup>	0.461	-34.36
12	1.1 · 10 <sup>-4</sup>	0.461	-34.368
13	1.2 · 10 <sup>-4</sup>	0.462	-34.376
14	1.3 · 10 <sup>-4</sup>	0.462	-34.385
15	1.4 · 10 <sup>-4</sup>	0.462	-34.393
16	1.5 · 10 <sup>-4</sup>	0.462	-34.402

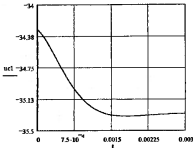


$$t := Z1^{(1)}$$

$$i7 := Z1^{(2)}$$

$$ucl := Z1^{(3)}$$

$$m := 1..100$$

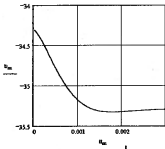


### Расчет переходного процесса вручную

$$m := 1..100$$

$$u_m := m \cdot 0.00003$$

$$u_m = e^{-1.771 \cdot 10^3 u_m} \left( 0.887 \cdot \sin\left(1.663 \cdot 10^3 \cdot u_m\right) + 0.995 \cdot \cos\left(1.663 \cdot 10^3 \cdot u_m\right) \right) \quad 35.29$$



# Расчет искоемых токов и напряжений

Пусть в исходной цепи требуется найти  $i_6$ ,  $i_1$ ,  $u_1$ .

$$C := \begin{pmatrix} -1 & \frac{-1}{R1} \\ 0 & \frac{-1}{R1} \\ -Rn & 1 \end{pmatrix} \quad C = \begin{pmatrix} -1 & -0.013 \\ 0 & -0.013 \\ -10 & 1 \end{pmatrix}$$

$$i := ZI^{(2)} \quad uc := ZI^{(3)} \quad I := ZI^{(1)}$$

$$k := 1..250$$

$$W_{k,1} := C_{1,1} \cdot i_k + C_{1,2} \cdot uc_k$$

$$W_{k,2} := C_{2,1} \cdot i_k + C_{2,2} \cdot uc_k$$

$$W_{k,3} := C_{3,1} \cdot i_k + C_{3,2} \cdot uc_k + 40$$

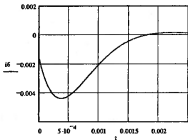
$$W_{k,4} := I_k$$

$$i_6 := W^{(1)} \quad i_1 := W^{(2)} \quad u_1 := W^{(3)}$$

	1	2	3	4
1	$-1.68 \cdot 10^{-3}$	0.457	1.111	0
2	$1.852 \cdot 10^{-3}$	0.457	1.104	$1 \cdot 10^{-5}$
3	$2.017 \cdot 10^{-3}$	0.457	1.097	$2 \cdot 10^{-5}$
4	$2.175 \cdot 10^{-3}$	0.458	1.09	$3 \cdot 10^{-5}$
5	$2.326 \cdot 10^{-3}$	0.458	1.082	$4 \cdot 10^{-5}$
6	$-2.47 \cdot 10^{-3}$	0.458	1.073	$5 \cdot 10^{-5}$
7	$2.608 \cdot 10^{-3}$	0.458	1.065	$6 \cdot 10^{-5}$
8	$-2.74 \cdot 10^{-3}$	0.458	1.056	$7 \cdot 10^{-5}$
9	$2.866 \cdot 10^{-3}$	0.458	1.047	$8 \cdot 10^{-5}$

w =

$w =$	10	$2.965 \cdot 10^{-3}$	0.458	1.037	$9 \cdot 10^{-5}$
	11	$3.099 \cdot 10^{-3}$	0.458	1.028	$1 \cdot 10^{-4}$
	12	$3.207 \cdot 10^{-3}$	0.458	1.016	$1.1 \cdot 10^{-4}$
	13	$3.309 \cdot 10^{-3}$	0.458	1.007	$1.2 \cdot 10^{-4}$
	14	$3.406 \cdot 10^{-3}$	0.456	0.997	$1.3 \cdot 10^{-4}$
	15	$3.498 \cdot 10^{-3}$	0.459	0.986	$1.4 \cdot 10^{-4}$
	16	$3.584 \cdot 10^{-3}$	0.459	0.975	$1.5 \cdot 10^{-4}$



### 3.3. Расчет переходного процесса в цепи с источниками синусоидальных ЭДС и тока



Рис. 3.2

Расчет переходного процесса осуществляется по той же методике, что и расчет переходного процесса в цепи с источником постоянной ЭДС. На рис. 3.2 приведена схема с двумя источниками, полученная из схемы на рис. 2.1 после коммутации.

Рассмотрим порядок вычислений более подробно.

Составляется вектор независимых начальных условий  $i_2(0)$  и  $u_C(0)$ , рассчитанных в разд. 3.2:

$$x_0 = \begin{bmatrix} -0,04 & 0,556 \end{bmatrix}^T.$$

На следующем этапе определяется длительность переходного процесса. Для этого составляется характеристическое уравнение. Предварительно находится операторное сопротивление в пассивной цепи относительно любых двух зажимов. Для схемы на рис. 3.2 имеем

$$Z(p) = \frac{1}{C_2 p} + \frac{(L_2 p + R_4 + R_3)}{R_2 + R_4 + R_3 + L_2 p}.$$

Приведем полученное выражение к общему знаменателю:

$$Z(p) = \frac{R_2 + R_3 + R_4 + [L_2 + R_2(R_4 + R_3) C_2] p + (R_4 + R_3) L_2 C_2 p^2}{(R_2 + R_4 + R_3 + L_2 p) C_2 p}.$$

Приравняв числитель нулю, получим характеристическое уравнение

$$L_2 C_2 R_2 p^2 + [L_2 + R_2(R_3 + R_4) C_2] p + R_3 + R_2 + R_4 = 0.$$

Далее составляем вектор коэффициентов

$$H = \begin{bmatrix} R_2 + R_3 + R_4 & L_2 + R_2(R_3 + R_4) C_2 & L_2 C_2 R_2 \end{bmatrix}^T.$$

и с помощью программы `polyroots(H)` находим корни характеристического уравнения. Для данного примера

$$p_{1,2} = -3 \cdot 10^3 \pm 2,293 \cdot 10^3 j.$$

Отсюда находим длительность переходного процесса

$$t_{\text{ин}} = 4/(3 \cdot 10^3) = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Составляются уравнения Кирхгофа для мгновенных значений токов и напряжений:

$$u_8 + R_2 i_5 = \epsilon,$$

$$-L_2 \frac{di_2}{dt} + u_8 + (R_4 + R_3) i_3 = \epsilon.$$

$$i_3 + i_2 - i_3 - i = 0,$$

$$i_3 - i_3 - i_3 = 0.$$

Преобразовав эту систему к матричной форме, получим уравнение состояния:

$$\begin{pmatrix} \frac{di_2}{dt} \\ \frac{du_3}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R_3 + R_4}{L_2} & \frac{1}{L_2} \\ \frac{1}{C_2} & \frac{1}{R_2 C_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_2 \\ u_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{1}{L_2} & \frac{R_3 + R_4}{L_2} \\ \frac{1}{R_2 C_2} & \frac{1}{C_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e(t) \\ i(t) \end{pmatrix}.$$

Образует матрицу D2, перемножив матрицы в правой части этого уравнения:

$$D2 = \begin{pmatrix} -\frac{R_3 + R_4}{L_2} \cdot X_1 + \frac{1}{L_2} \cdot X_2 - \frac{1}{L_2} \cdot e(t) + \frac{R_3 + R_4}{L_2} \cdot i(t) \\ \frac{1}{C_2} \cdot X_1 - \frac{1}{R_2 C_2} \cdot X_2 + \frac{1}{R_2 C_2} \cdot e(t) + \frac{1}{C_2} \cdot i(t) \end{pmatrix},$$

где  $X_1 = i_3$ ,  $X_2 = u_3$ ,

$$e(t) = E_m \sin(2512t + \psi_e),$$

$$i(t) = I_m \sin(2512t + \psi_i).$$

Расчет переходного процесса осуществляется оператором

$$Z2 = \text{rkfixed}(x0, 0, t_{\text{min}}, 250, D2).$$

Для построения графиков необходимо из матрицы Z2 выделить столбцы

$$i = Z2^{<1>}, \quad i_2 = Z2^{<2>}, \quad u_C = Z2^{<3>}.$$

Пусть по заданию, кроме тока в индуктивности и напряжения на емкости, требуется найти токи  $i_3$ ,  $i_3$ ,  $i_3$ . Образует вектор

$$Y = [i_3 \quad i_3 \quad i_3]^T.$$

Из уравнений Кирхгофа находим

$$i_8 = -i_2 - u_8/R_3 + e/R_2 + i,$$

$$i_5 = -u_8/R_3 + e/R_2,$$

$$i_3 = -i_2 + i,$$

или в матричной форме

$$\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} i_8 \\ i_5 \\ i_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & -\frac{1}{R_2} \\ 0 & -\frac{1}{R_3} \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_2 \\ u_8 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{R_2} & 1 \\ \frac{1}{R_3} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e(t) \\ i(t) \end{pmatrix}.$$

Отсюда следует, что

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} -1 & -\frac{1}{R_2} \\ 0 & -\frac{1}{R_3} \\ -1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{pmatrix} \frac{1}{R_2} & 1 \\ \frac{1}{R_3} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Для расчета искоемых токов составляем программу:

$$k = 1..250$$

$$t_k = Z2_{k,1}$$

$$i_k = Z2_{k,2}$$

$$u_{Ck} = Z2_{k,3}$$

$$W_{k,1} = C_{11} i_k + C_{12} u_{Ck} + D_{11} E_m \sin(2512t + \psi_e) + \\ + D_{12} I_m \sin(2512t + \psi_i)$$

$$W_{k,2} = C_{21} i_k + C_{22} u_{Ck} + D_{21} E_m \sin(2512t + \psi_e) + \\ + D_{22} I_m \sin(2512t + \psi_i)$$

$$W_{A,3} = C_{31} i_A + C_{31} u_{Ck} + D_{31} E_m \sin(2512t + \psi_e) + D_{32} I_m \sin(2512t + \psi_i)$$

$$W_{A,4} = i_A$$

Для построения графиков необходимо образовать расширенный вектор с помощью операторов

$$i_B = W^{(1)}, \quad i_C = W^{(2)}, \quad i_D = W^{(3)}, \quad i = W^{(4)}$$

Ниже приведена распечатка программы расчета переходного процесса в цепи с источниками синусоидальных ЭДС и тока.

### РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ЦЕПИ С ИСТОЧНИКАМИ СИНУСОИДАЛЬНЫХ ЭДС И ТОКА

$$H := \begin{bmatrix} R2 + R4 + R3 \\ L2 + R3(R3 + R4) - C2 \\ L2 - C2 R2 \end{bmatrix} \quad \text{polyroots(H)} = \begin{pmatrix} -9.569 \times 10^3 \\ -2.432 \times 10^3 \end{pmatrix}$$

$$tn := \frac{4}{2.432 \cdot 10^3} \quad tn = 1.645 \times 10^{-3}$$

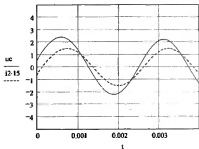
Независимые начальные условия

$$x0 := \begin{pmatrix} -0.04 \\ 0.556 \end{pmatrix}$$

Составляем уравнения по методу пространства состояний и правую часть этих уравнений записываем в виде матрицы  $D2(t, X)$ .

$$e(t) := E_m \sin(2512t + \psi_e) \quad i(t) := I_m \sin(2512t + \psi_i)$$

$$D2(t, X) := \begin{pmatrix} \frac{-R4 - R3}{L2} \cdot X_1 + \frac{1}{L2} \cdot X_2 + \frac{R3 + R4}{L2} \cdot i(t) - \frac{1}{L2} \cdot e(t) \\ \frac{-1}{C2} \cdot X_1 - \frac{1}{R2 \cdot C2} \cdot X_2 + \frac{1}{C2} \cdot i(t) + \frac{1}{R2 \cdot C2} \cdot e(t) \end{pmatrix}$$

$t0 := 0$  $t1 := 0.004$  $N := 250$  $Z := \text{rkfixed}(t0, t1, N, D2)$  $i2 := Z^{(2)}$  $uc := Z^{(3)}$  $i := Z^{(1)}$ 

### Расчет некомпых токов и напряжений

$$C := \begin{pmatrix} -1 & -1 \\ -1 & \frac{1}{R2} \\ 0 & -1 \\ -1 & \frac{1}{R2} \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$C := \begin{pmatrix} -1 & -0.01 \\ 0 & -0.01 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$D := \begin{pmatrix} \frac{1}{R2} & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$D := \begin{pmatrix} 0.01 & 1 \\ 0.01 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

 $k := 1..250$  $i_k := Z_{k,1}$  $uc_k := Z_{k,3}$  $i_k := Z_{k,2}$ 

$$W_{k,1} := C_{1,1} \cdot i_k + C_{1,2} \cdot uc_k + D_{1,1} \cdot \text{Ern} \cdot \sin(2512 \cdot t_k + \varphi c) + D_{1,2} \cdot \text{Im} \cdot \sin(2512 \cdot t_k + \varphi i)$$

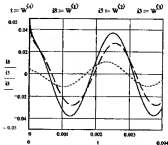


$$W_{k,2} = C_{2,1} \cdot i_k + C_{2,2} \cdot u_k + D_{2,1} \cdot E_m \sin(2512 \cdot t_k + \varphi) + D_{2,2} \cdot I_m \sin(2512 t_k + \varphi)$$

$$W_{k,3} = C_{3,1} \cdot i_k + C_{3,2} \cdot u_k + D_{3,1} \cdot E_m \sin(\omega \cdot t_k + \varphi) + D_{3,2} \cdot I_m \sin(\omega \cdot t_k + \varphi)$$

$$W_{k,4} = i_k$$

	1	2	3	4
1	0.044	$4.44 \cdot 10^{-3}$	0.04	0
2	0.042	$1.091 \cdot 10^{-3}$	0.038	$1.6 \cdot 10^{-3}$
3	0.04	$3.782 \cdot 10^{-3}$	0.036	$3.2 \cdot 10^{-3}$
4	0.038	$3.502 \cdot 10^{-3}$	0.034	$4.8 \cdot 10^{-3}$
5	0.036	$3.246 \cdot 10^{-3}$	0.033	$6.4 \cdot 10^{-3}$
6	0.035	$3.007 \cdot 10^{-3}$	0.032	$8 \cdot 10^{-3}$
7	0.033	$2.78 \cdot 10^{-3}$	0.031	$9.6 \cdot 10^{-3}$
8	0.032	$2.58 \cdot 10^{-3}$	0.03	$1.12 \cdot 10^{-2}$
9	0.031	$2.345 \cdot 10^{-3}$	0.029	$1.28 \cdot 10^{-2}$
10	0.03	$2.13 \cdot 10^{-3}$	0.028	$1.44 \cdot 10^{-2}$
11	0.029	$1.915 \cdot 10^{-3}$	0.027	$1.6 \cdot 10^{-2}$
12	0.029	$1.696 \cdot 10^{-3}$	0.027	$1.76 \cdot 10^{-2}$
13	0.027	$1.472 \cdot 10^{-3}$	0.026	$1.92 \cdot 10^{-2}$
14	0.028	$1.243 \cdot 10^{-3}$	0.025	$2.08 \cdot 10^{-2}$
15	0.026	$1.007 \cdot 10^{-3}$	0.025	$2.24 \cdot 10^{-2}$
16	0.025	$7.638 \cdot 10^{-4}$	0.024	$2.4 \cdot 10^{-2}$



Титульный лист курсовой работы

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Московский авиационный институт  
(государственный технический университет)

---

Факультет № 3

Кафедра 309

Группа 03—314

Курсовая работа  
по теоретическим основам электротехники

**АНАЛИЗ СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ  
В УСТАНОВИВШЕМСЯ И ПЕРЕХОДНОМ РЕЖИМАХ**

Студент

И.И. Иванов

Преподаватель

П.П. Петров

Москва

2006 г.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аслабеков Г.Н. Теоретические основы электротехники. Ч.1: Линейные электрические цепи. — М.: Энергия, 1978.
2. Булеков В.П., Савостьянов В.В., Тузов А.А., Шамурин А.К. Алгоритмы исследования и особенности расчёта на ЭВМ сложных электрических цепей в диалоговом режиме. — М.: Изд-во МАН, 1988.
3. Бушурин П.А., Кольцова Н.С., Миронов Н.В. Основы компьютерных технологий электротехники. — М.: Изд-во МЭИ, 2001.
4. Карьянов Д.В. Самоучитель MathCAD 2001. — СПб.: БХВ — Петербург, 2001.
5. Колосов С.П., Сафоров Ю.А. Нелинейные цепи: двухполосники и четырёхполосники. Нестационарные цепи. — М.: Изд-во МАН, 1993.