

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Пензенский государственный университет» (ПГУ)

Исследование трехфазных электрических цепей в стационарном и переходном режимах

Методические указания

Составители:
В. Н. Ашанин, В. Я. Горячев

Пенза
Издательство ПГУ
2020

УДК 681.3
И85

Р е ц е н з е н т

доктор технических наук, профессор
кафедры «Тракторы, автомобили и теплоэнергетика»
Пензенского государственного аграрного университета
С. В. Тимохин

Исследование трехфазных электрических цепей в стационарном и переходном режимах : метод. указания / сост.: В. Н. Ашанин, В. Я. Горячев. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. – 32 с.

Сформулированы варианты задания по анализу трехфазных электрических цепей в установившемся и переходном режимах. Представлены основные соотношения электрических величин, необходимые для выполнения курсовой работы, а также даны методические рекомендации для каждого этапа расчета трехфазной электрической цепи.

Издание подготовлено на кафедре «Электроэнергетика и электротехника» ПГУ и предназначено для обучающихся по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

УДК 681.3

© Пензенский государственный
университет, 2020

ВВЕДЕНИЕ

Трехфазные электрические цепи являются основой электроэнергетических сетей и систем, обеспечивающих энергией промышленные предприятия и жилые районы, которые, с точки зрения электроэнергетики, являются потребителями различного характера.

В быту используются в основном электрические установки и аппараты, которые с электрической точки зрения являются приемниками практически резистивного характера, коэффициент преобразования электрической энергии в тепловую или механическую которых близок к единице. Они обеспечиваются питанием от однофазной сети гармонического тока, время и место их подключения являются случайными, поэтому трехфазная цепь, питающая жилые районы, работает на несимметричную нагрузку.

На промышленных предприятиях в трехфазную сеть включаются различные станки и аппараты, в преобладающей части которых электрическая энергия преобразуется в механическую и тепловую. Нагрузка по фазам распределена более равномерно в основном из-за наличия большого количества трехфазных электрических машин, представляющие для сети симметричную нагрузку, и из-за лучшей организации подключения к сети других элементов потребления. Однако электрические двигатели часто работают в недогруженном режиме, при котором их коэффициент мощности достаточно низок, что снижает эффективность работы электростанций и линий передачи электрической энергии.

Для улучшения коэффициента мощности на практике используются как автоматические системы, так и электромашинные компенсаторы реактивного тока или реактивной мощности. Такие устройства устанавливаются в местах ввода фидеров электропитания на предприятия, что позволяет контролировать коэффициент мощности перед компенсатором и после.

При эксплуатации сетей и систем электроснабжения нередки случаи подключения и отключения от промышленной сети мощных потребителей. Не удастся избежать и аварийных режимов работы сети, в частности, связанных с появлением неисправностей в электромашинных установках, вызванных короткими замыканиями в обмотках. Это приводит к переходу работы электрической сети из одного в другой устойчивый энергетический режим.

Возникающий переходный процесс необходимо анализировать как для правильного проектирования устройств защиты, так и для определения законов изменения токов и напряжений в сети, поскольку переходный процесс может привести к перенапряжениям и перегрузкам по току. Это может привести к выводу из строя дорогостоящего оборудования.

Вышеприведенное позволяет сформулировать ряд вопросов для рассмотрения в курсовой работе:

- 1) расчет трехфазной цепи гармонического тока в установившемся режиме при подключенных потребителях двух типов;
- 2) расчет параметров элементов компенсатора, который будучи подключенным параллельно одному из потребителей позволил бы улучшить коэффициент мощности потребителя и сети в целом;
- 3) расчет трехфазной сети с подключенным компенсатором;
- 4) сравнительный анализ работы цепи электропитания до и после подключения компенсатора;
- 5) анализ переходного процесса в одной из фаз цепи, вызванного переключениями или аварийной ситуацией в одном из потребителей электрической энергии;
- 6) анализ различных режимов работы всей трехфазной цепи.

ЦЕЛЬ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Целью настоящей курсовой работы является ознакомление студентов с различными режимами работы трехфазной цепи, обучение навыкам расчета трехфазных цепей, работающих в установившихся режимах, ознакомление со способами улучшения качества работы трехфазной сети и практическое применение методов анализа переходных процессов в электрических цепях с целью выявления возможных перенапряжений и перегрузок.

ИСХОДНЫЕ УСЛОВИЯ

В трехфазную промышленную цепь с линейным напряжением U (частотой 50 Гц) включены два потребителя электрической энергии 1 и 2 (рис. 1). Первый потребитель представляет собой резистивную несимметричную нагрузку, соединенную «звездой» с нулевым проводом, мощности фаз которой составляют P_{A1} ; P_{B1} ; P_{C1} .

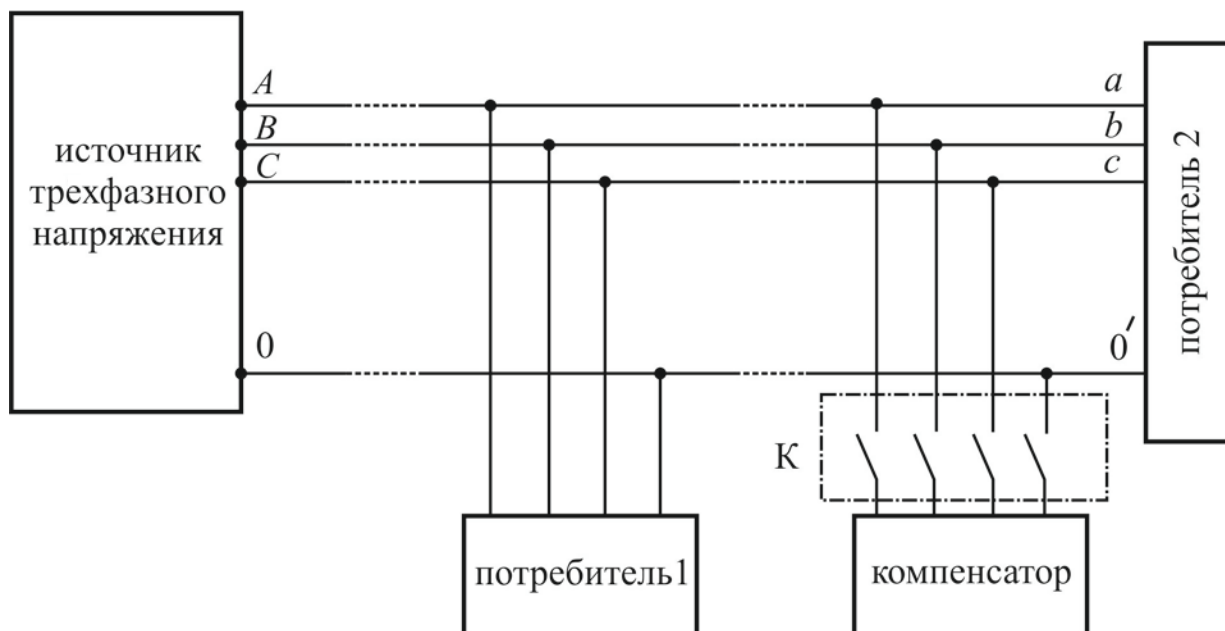


Рис. 1. Структурная схема трехфазной сети

Второй потребитель является симметричной нагрузкой с общей активной мощностью P_2 и коэффициентом мощности $\cos\varphi_2$ активно-индуктивного характера. Фазы второй нагрузки соединены «треугольником» или «звездой» в зависимости от варианта. Для улучшения коэффициента мощности второго потребителя в сеть может быть включен компенсатор, обладающий потерями активной мощности P_K .

Источник трехфазного напряжения представляет собой генератор, обмотка которого соединена «звездой» с нулевым проводом с внутренним фазным сопротивлением R_0 и x_0 .

ЗАДАНИЕ

Для заданного варианта трехфазной сети:

1. Рассчитать токи и напряжения на элементах при отключенном компенсаторе, мощности потребителей и общую мощность всей сети. Вычислить результирующий коэффициент мощности всей сети.

Примечание. При расчете трехфазной цепи рекомендуется принять начальную фазу линейного напряжения U_{AB} равной 45° . Сопротивления линейных проводов принять равными нулю.

2. По полученным результатам расчета построить векторные диаграммы токов и напряжений потребителей и источника питания.

3. Начертить развернутую схему цепи с указанием эквивалентных резистивных сопротивлений и индуктивностей в фазах приемников и источника.

4. Вычислить эквивалентные параметры компенсатора из условия улучшения коэффициента мощности второго приемника до значения $\cos \varphi_{2к}$. В расчетах учесть мощность потерь в компенсаторе P_k .

5. Рассчитать трехфазную сеть при включенном компенсаторе, т.е. определить токи фаз компенсатора и линейные токи источника, питающего два потребителя и компенсатор.

6. Построить векторные диаграммы токов и напряжений источника и приемников при подключенном компенсаторе.

7. Вычислить результирующий коэффициент мощности всей трехфазной сети, работающей с компенсатором.

8. Вычислить электродвижущую силу (ЭДС) одной из фаз генератора из условия реальной нагрузки при наличии внутреннего сопротивления генератора. Индекс фазы указан в таблице вариантов.

9. В той же фазе трехфазной цепи определить закон изменения тока или напряжения (в зависимости от варианта) при переходном процессе в одном из трех случаев:

а) при подключении приемников и компенсатора к источнику трехфазного напряжения;

б) при подключении компенсатора к сети;

в) при частичном коротком замыкании в приемнике 2.

Примечание. Под частичным коротким замыканием подразумевается уменьшение эквивалентного резистивного сопротивления и индуктивности фазы приемника 2 в два раза.

10. Построить в масштабе временную диаграмму найденной величины.

11. Проанализировать расчеты и сделать выводы о режиме работы трехфазной цепи без компенсатора, об эффективности применения компенсатора, о распределении нагрузки и о переходных процессах в цепи.

Примечания:

1. Для расчета переходного процесса в одной из фаз цепи рекомендуется при необходимости заменить соединение приемника 2 эквивалентным соединением «звезда» с нулевым проводом.

2. Для упрощения анализа переходных процессов рекомендуется параллельную схему замещения фазной нагрузки компенсатора заменить эквивалентной последовательной.

ТАБЛИЦА ВАРИАНТОВ

Номер варианта	$U, В$	$P_A, кВт$	$P_B, кВт$	$P_C, кВт$	$P_2, кВт$	$\cos \varphi_2$	Соед. пр2	$P_{\kappa}, кВт$	$R_0, Ом \times 10^{-3}$	$x_0, Ом \times 10^{-2}$	$\cos \varphi_{2\kappa}$	Индекс фазы	Вар. расч. перех. пр.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	127	5,6	10	6	60	0,45	Y	1	41	14	1	B	a
2	220	6	9	4	58	0,6	Y	0,7	52	17,5	0,95	C	б
3	380	6,2	8,6	5	45	0,43	Δ	0,8	63	12	0,96	B	в
4	660	6,8	8,3	10	50	0,51	Y	0,6	84	30	0,97	B	a
5	660	7	8	6,3	56	0,42	Δ	0,9	24,5	24	0,98	C	б
6	380	7,3	7,6	3	52	0,59	Δ	1	63,5	27	0,99	B	в
7	220	7,6	7,3	4,5	35	0,62	Δ	0,7	25	19	1	B	a
8	127	8	7	5	39	0,45	Y	0,8	51	12	0,96	B	б
9	127	8,3	6,8	4	42	0,53	Δ	0,65	33	7,2	0,97	C	в
10	220	8,6	6,2	10	58	0,41	Y	0,75	26	16	0,98	A	a
11	380	9	6	5	44	0,57	Y	0,65	35	24	0,99	B	б
12	660	10	5,6	7	56	0,42	Y	0,85	39	30	0,95	A	в
13	660	7	6	10	46	0,47	Y	0,9	42	36	1	A	a
14	380	7,3	5,6	9	54	0,49	Δ	0,95	31	22	0,97	C	б
15	220	7,6	10	4	48	0,6	Y	0,9	24	18	0,98	C	в
16	127	8	8,6	7	52	0,57	Δ	0,85	13	9	0,99	C	a
17	127	8,3	4	6	50	0,51	Y	0,65	10	8	1	B	б
18	660	8,6	4,3	9	52	0,45	Δ	0,75	38	32	0,95	C	в
19	220	1,0	4,8	7	48	0,47	Δ	0,65	23	20	0,96	C	a
20	380	5,6	10	7	46	0,45	Y	0,8	35	28	0,98	B	б
21	127	6	6,2	9	54	0,51	Δ	0,7	29	13	0,99	B	в
22	380	6,2	8	4,5	46	0,57	Y	1	45	25	1	B	a
23	660	6,8	4	5,3	56	0,6	Δ	0,95	51	50	0,97	A	б
24	220	7	5,6	9	44	0,49	Y	0,8	23	18	0,96	C	в
25	380	7,3	6	4,5	48	0,42	Δ	0,85	69	35	0,95	C	a
26	660	9	6,5	7	51	0,47	Δ	0,75	45	38	0,95	B	б
27	127	8,6	5,8	6	59	0,41	Y	0,65	28	10	1	B	в
28	660	8,3	6	4	41	0,57	Y	0,6	39	48	0,99	B	a
29	127	8	7	5	57	0,42	Y	0,8	19	10	0,98	C	б
30	220	7,6	7	10	49	0,53	Δ	0,75	43	18	0,97	C	в
31	380	7,3	4	8	55	0,45	Δ	0,7	27	26	0,96	B	a
32	660	7	5	9,5	47	0,42	Y	0,9	43	41	0,95	A	б
33	220	6	6	9	53	0,59	Δ	0,95	29	20	0,98	C	в
34	127	5,6	4,5	8	45	0,62	Δ	0,6	9,0	12,3	0,96	C	a
35	380	5	9	6,3	51	0,45	Y	0,65	33	25	0,99	B	б
36	220	4	10	7	43	0,53	Y	0,7	20	16	1	B	в
37	660	4,5	12	8	59	0,41	Δ	0,4	49	48	0,95	C	a
38	220	5,3	7	9	51	0,57	Y	0,45	28	19	0,98	B	б
39	380	6	4	8	48	0,49	Δ	0,5	29	27	0,97	C	в
40	127	8	3	6	54	0,6	Δ	0,55	41	12	0,99	C	a

1	2	3	4	5	6	7	89	10	11	12	13	14	15
41	220	6	10	5	60	0,55	Y	1	60	19	1	B	a
42	127	10	9	6	58	0,6	Y	0,75	29	14,5	0,95	C	б
43	380	5,2	8,0	5	50	0,45	Δ	0,85	53	26	0,99	B	в
44	660	6,5	8,5	10	55	0,55	Y	0,65	140	46	0,96	B	a
45	220	8	7	6,5	45	0,65	Δ	0,95	78	16	0,95	C	б
46	380	5,3	8,6	5	62	0,50	Δ	1	105	28	0,99	B	в
47	660	10,6	8,9	4,5	40	0,65	Δ	0,8	55	50	1	A	a
48	220	6	8	5	59	0,53	Y	0,7	29	14,5	0,98	B	б
49	220	8,5	5,8	4	49	0,47	Δ	0,65	82	14	0,97	C	в
50	127	5,6	8,2	8	58	0,54	Y	0,9	30	12,6	0,95	A	a
51	127	5	9	6	48	0,67	Y	0,83	18,5	13,8	0,99	B	б
52	660	6,5	10	8,6	66	0,55	Y	0,95	129	50	0,98	A	в
53	660	8	8,9	8,5	45	0,67	Y	0,9	84	40	1	A	a
54	220	8,5	5,6	7	65	0,59	Δ	0,85	33	24,0	0,99	C	б
55	380	7,6	5	5	58	0,6	Y	0,9	82	29	0,96	C	в
56	380	8,5	10	8	55	0,68	Δ	0,89	65	24	0,98	C	a
57	127	8,4	6,4	4,6	62	0,55	Y	0,75	85,1	14	1	B	б
58	127	5,6	4,6	8,5	53	0,48	Δ	0,8	38	13	0,99	C	в
59	220	4,8	7,8	8,5	58	0,57	Δ	0,98	23	15	0,98	C	a
60	660	4,6	8	10	56	0,63	Y	0,83	68	47	0,96	B	б
61	380	6	9	6,8	48	0,44	Δ	0,75	29	25	0,99	B	в
62	380	7,2	8	5,8	56	0,54	Y	1	25	22,5	1	B	a
63	127	5,8	4,5	7,3	66	0,5	Δ	0,85	51	14	0,94	A	б
64	220	7	9	10,5	54	0,59	Y	0,81	93	13,6	0,95	C	в
65	220	8,3	6,5	5,5	62	0,42	Δ	0,74	19	15	0,98	C	a
66	660	6,8	10	8,8	51	0,62	Δ	0,88	125	50	0,99	B	б
67	660	8,5	6,8	7,6	57	0,45	Y	0,66	80	43	0,93	B	в
68	127	6,3	8,6	4,5	47	0,42	Y	0,76	41,6	18	0,96	B	a
69	220	6	7	8	55	0,55	Y	0,85	79	14,0	0,98	C	б
70	380	8,6	6,5	10	59	0,53	Δ	0,75	63	22,5	0,97	C	в
71	380	7,8	4,5	8,5	68	0,58	Δ	0,71	27	32	0,95	B	a
72	127	7	6	9,5	56	0,43	Y	0,96	43	12,0	0,96	A	б
73	220	8	10	9	53	0,49	Δ	0,95	29	14,5	0,99	C	в
74	660	5,8	6,5	7,5	45	0,66	Δ	0,85	190	42,3	0,96	C	a
75	380	7,5	9	6,5	51	0,48	Y	0,75	83	25,4	0,99	B	б
76	220	4,9	10	7,5	43	0,55	Y	0,7	20	16	1	B	в
77	660	4,8	11	6,8	59	0,41	Δ	0,63	124	53,6	0,95	C	a
78	127	6,3	7,5	9	61	0,54	Y	0,48	28	13,0	0,96	B	б
79	380	6	6,5	8,5	49	0,48	Δ	0,5	29	3,0	0,97	C	в
80	660	8,1	6,6	6	54	0,6	Δ	0,45	121	42,0	0,99	C	a

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
81	220	5,6	10	5	60	0,55	Y	1	50	22	1	<i>B</i>	a
82	127	6	9	6	58	0,6	Y	0,75	22	11,5	0,95	<i>C</i>	б
83	380	6,2	8,0	5	50	0,45	Δ	0,85	52	25,9	0,99	<i>B</i>	в
84	660	6,8	8,5	10	55	0,55	Y	0,65	91,4	51,6	0,96	<i>B</i>	a
85	220	7	7	6,5	45	0,65	Δ	0,95	18	16	0,95	<i>C</i>	б
86	380	7,3	8,6	5	62	0,50	Δ	1	50,5	28	0,99	<i>B</i>	в
87	660	7,6	8,9	4,5	40	0,65	Δ	0,8	95,5	49	1	<i>A</i>	a
88	220	8	8	5	59	0,53	Y	0,7	29	14,5	0,98	<i>B</i>	б
89	220	8,3	5,8	4	49	0,47	Δ	0,65	31,2	14	0,97	<i>C</i>	в
90	127	8,6	8,2	8	58	0,54	Y	0,9	50	10,6	0,95	<i>A</i>	a
91	127	9	9	6	48	0,67	Y	0,83	18,5	13,8	0,99	<i>B</i>	б
92	660	10	10	8,6	66	0,55	Y	0,95	92,9	40	0,98	<i>A</i>	в
93	660	7	8,9	8,5	45	0,67	Y	0,9	98,4	50	1	<i>A</i>	a
94	220	7,3	5,6	7	65	0,59	Δ	0,85	33	24,0	0,99	<i>C</i>	б
95	380	7,6	5	5	58	0,6	Y	0,9	24	29	0,96	<i>C</i>	в
96	380	8	10	8	55	0,68	Δ	0,89	35	24	0,98	<i>C</i>	a
97	127	8,3	6,4	4,6	62	0,55	Y	0,75	51	13,4	1	<i>B</i>	б
98	127	8,6	4,6	8,5	53	0,48	Δ	0,8	38	13,2	0,99	<i>C</i>	в
99	220	1,0	7,8	8,5	58	0,57	Δ	0,98	23	16	0,98	<i>C</i>	a
100	660	5,6	8	10	56	0,63	Y	0,83	68	57	0,96	<i>B</i>	б
101	380	6	9	6,8	48	0,44	Δ	0,75	79	25	0,99	<i>B</i>	в
102	380	6,2	8	5,8	56	0,54	Y	1	61,5	25	1	<i>B</i>	a
103	127	6,8	4,5	7,3	66	0,5	Δ	0,85	51	14,5	0,94	<i>A</i>	б
104	220	7	9	10,5	54	0,59	Y	0,81	23	16	0,95	<i>C</i>	в
105	220	7,3	6,5	5,5	62	0,42	Δ	0,74	19	17	0,98	<i>C</i>	a
106	660	9	10	8,8	51	0,62	Δ	0,88	92,5	52	0,99	<i>B</i>	б
107	660	8,6	6,8	7,6	57	0,45	Y	0,66	80	53	0,93	<i>B</i>	в
108	127	8,3	8,6	4,5	47	0,42	Y	0,76	16	13	0,96	<i>B</i>	a
109	220	8	7	8	55	0,55	Y	0,85	90	22	0,98	<i>C</i>	б
110	380	7,6	6,5	10	59	0,53	Δ	0,75	130	35	0,97	<i>C</i>	в
111	380	7,3	4,5	8,5	68	0,58	Δ	0,71	27	26	0,95	<i>B</i>	a
112	127	7	6	9,5	56	0,43	Y	0,96	43	15,0	0,96	<i>A</i>	б
113	220	6	10	9	53	0,49	Δ	0,95	29	22	0,99	<i>C</i>	в
114	660	5,6	6,5	7,5	45	0,66	Δ	0,85	190	53	0,96	<i>C</i>	a
115	380	5	9	6,5	51	0,48	Y	0,75	63	34	0,99	<i>B</i>	б
116	220	4	10	7,5	43	0,55	Y	0,7	20	16	1	<i>B</i>	в
117	660	4,5	11	6,8	59	0,41	Δ	0,63	240	58	0,95	<i>C</i>	a
118	127	5,3	7,5	9	61	0,54	Y	0,48	28	13	0,96	<i>B</i>	б
119	380	6	6,5	8,5	49	0,48	Δ	0,5	29	27	0,97	<i>C</i>	в
120	660	8	6,6	6	54	0,6	Δ	0,45	121	60	0,99	<i>C</i>	a

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
121	220	6	10	5	60	0,55	Y	1	20	15	1	B	a
122	127	10	9	6	58	0,6	Y	0,75	25	14,5	0,95	C	б
123	380	5,2	8,6	5	50	0,45	Δ	0,85	56	25,9	0,99	B	в
124	660	6,5	8,3	10	55	0,55	Y	0,65	91,4	61,6	0,96	B	a
125	220	8	8	6,5	45	0,65	Δ	0,95	38	16	0,95	C	б
126	380	5,3	7,6	5	62	0,50	Δ	1	30,5	18	0,99	B	в
127	660	10,6	7,3	4,5	40	0,65	Δ	0,8	55,5	59	1	A	a
128	220	6	7	5	59	0,53	Y	0,7	72	24,5	0,98	B	б
129	220	8,5	6,8	4	49	0,47	Δ	0,65	51,2	14	0,97	C	в
130	127	5,6	6,2	8	58	0,54	Y	0,9	15	14	0,95	A	a
131	127	5	6	6	48	0,67	Y	0,83	18,5	12,8	0,99	B	б
132	660	6,5	5,6	8,6	66	0,55	Y	0,95	129	60	0,98	A	в
133	660	8	6	8,5	45	0,67	Y	0,9	88,4	50	1	A	a
134	220	8,5	5,6	7	65	0,59	Δ	0,85	33	18	0,99	C	б
135	380	7,6	10	5	58	0,6	Y	0,9	24	29	0,96	C	в
136	380	8,5	8,6	8	55	0,68	Δ	0,89	15	24	0,98	C	a
137	127	8,4	4	4,6	62	0,55	Y	0,75	51	14	1	B	б
138	127	5,6	4,3	8,5	53	0,48	Δ	0,8	38	13,2	0,99	C	в
139	220	4,8	4,8	8,5	58	0,57	Δ	0,98	23	16	0,98	C	a
140	660	4,6	10	10	56	0,63	Y	0,83	38	47	0,96	B	б
141	380	6	6,2	6,8	48	0,44	Δ	0,75	99	25	0,99	B	в
142	380	7,2	8	5,8	56	0,54	Y	1	81,5	25	1	B	a
143	127	5,8	4	7,3	66	0,5	Δ	0,85	51	12,5	0,94	A	б
144	220	7	5,6	10,5	54	0,59	Y	0,81	23	16	0,95	C	в
145	220	8,3	6	5,5	62	0,42	Δ	0,74	19	20	0,98	C	a
146	660	6,8	6,5	8,8	51	0,62	Δ	0,88	95	52	0,99	B	б
147	660	8,5	5,8	7,6	57	0,45	Y	0,66	68	48	0,93	B	в
148	127	6,3	6	4,5	47	0,42	Y	0,76	16	11,8	0,96	B	a
149	220	6	7	8	55	0,55	Y	0,85	29	22	0,98	C	б
150	380	8,6	7	10	59	0,53	Δ	0,75	33	25	0,97	C	в
151	380	7,8	4	8,5	68	0,58	Δ	0,71	27	26	0,95	B	a
152	127	7	5	9,5	56	0,43	Y	0,96	43	15,1	0,96	A	б
153	220	8	6	9	53	0,49	Δ	0,95	29	22	0,99	C	в
154	660	5,8	4,5	7,5	45	0,66	Δ	0,85	99	53	0,96	C	a
155	380	7,5	9	6,5	51	0,48	Y	0,75	73	34	0,99	B	б
156	220	4,9	10	7,5	43	0,55	Y	0,7	20	16	1	B	в
157	660	4,8	12	6,8	59	0,41	Δ	0,63	94	58	0,95	C	a
158	127	6,3	7	9	61	0,54	Y	0,48	28	13,0	0,96	B	б
159	380	6	4	8,5	49	0,48	Δ	0,5	29	27	0,97	C	в
160	660	8,1	3	6	54	0,6	Δ	0,45	61	50	0,99	C	a

Продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
161	220	6	10	6	60	0,55	Y	1	20	22	1	<i>B</i>	a
162	127	10	9	4	58	0,6	Y	0,75	12	14,5	0,95	<i>C</i>	б
163	380	5,2	8,0	5	50	0,45	Δ	0,85	35	25,9	0,99	<i>B</i>	в
164	660	6,5	8,5	10	55	0,55	Y	0,65	61,4	51,6	0,96	<i>B</i>	a
165	220	8	7	6,3	45	0,65	Δ	0,95	18	16	0,95	<i>C</i>	б
166	380	5,3	8,6	3	62	0,50	Δ	1	20,5	28	0,99	<i>B</i>	в
167	660	10,6	8,9	4,5	40	0,65	Δ	0,8	55,5	49	1	<i>A</i>	a
168	220	6	8	5	59	0,53	Y	0,7	20	14,5	0,98	<i>B</i>	б
169	220	8,5	5,8	4	49	0,47	Δ	0,65	32	24	0,97	<i>C</i>	в
170	127	5,6	8,2	10	58	0,54	Y	0,9	15	16	0,95	<i>A</i>	a
171	127	5	9	5	48	0,67	Y	0,83	18,5	16,8	0,99	<i>B</i>	б
172	660	6,5	10	7	66	0,55	Y	0,95	62,9	50	0,98	<i>A</i>	в
173	660	8	8,9	10	45	0,67	Y	0,9	84	60	1	<i>A</i>	a
174	220	8,5	5,6	9	65	0,59	Δ	0,85	33	17	0,99	<i>C</i>	б
175	380	7,6	5	4	58	0,6	Y	0,9	24	29	0,96	<i>C</i>	в
176	380	8,5	10	7	55	0,68	Δ	0,89	25	24	0,98	<i>C</i>	a
177	127	8,4	6,4	6	62	0,55	Y	0,75	51	14	1	<i>B</i>	б
178	127	5,6	4,6	9	53	0,48	Δ	0,8	38	13,0	0,99	<i>C</i>	в
179	220	4,8	7,8	7	58	0,57	Δ	0,98	23	16	0,98	<i>C</i>	a
180	660	4,6	8	7	56	0,63	Y	0,83	38	47	0,96	<i>B</i>	б
181	380	6	9	9	48	0,44	Δ	0,75	29	25	0,99	<i>B</i>	в
182	380	7,2	8	4,5	56	0,54	Y	1	35	25	1	<i>B</i>	a
183	127	5,8	4,5	5,3	66	0,5	Δ	0,85	51	15,0	0,94	<i>A</i>	б
184	220	7	9	9	54	0,59	Y	0,81	23	16	0,95	<i>C</i>	в
185	220	8,3	6,5	4,5	62	0,42	Δ	0,74	19	17	0,98	<i>C</i>	a
186	660	6,8	10	7	51	0,62	Δ	0,88	75	52	0,99	<i>B</i>	б
187	660	8,5	6,8	6	57	0,45	Y	0,66	80	53	0,93	<i>B</i>	в
188	127	6,3	8,6	4	47	0,42	Y	0,76	26	19	0,96	<i>B</i>	a
189	220	6	7	5	55	0,55	Y	0,85	90	22	0,98	<i>C</i>	б
190	380	8,6	6,5	10	59	0,53	Δ	0,75	130	35	0,97	<i>C</i>	в
191	380	7,8	4,5	8	68	0,58	Δ	0,71	27	26	0,95	<i>B</i>	a
192	127	7	6	9,5	56	0,43	Y	0,96	43	15,1	0,96	<i>A</i>	б
193	220	8	10	9	53	0,49	Δ	0,95	29	22	0,99	<i>C</i>	в
194	660	5,8	6,5	8	45	0,66	Δ	0,85	190	53	0,96	<i>C</i>	a
195	380	7,5	9	6,3	51	0,48	Y	0,75	130	34	0,99	<i>B</i>	б
196	220	4,9	10	7	43	0,55	Y	0,7	20	16	1	<i>B</i>	в
197	660	4,8	11	8	59	0,41	Δ	0,63	240	58	0,95	<i>C</i>	a
198	127	6,3	7,5	9	61	0,54	Y	0,48	28	13,0	0,96	<i>B</i>	б
199	380	6	6,5	8	49	0,48	Δ	0,5	29	37	0,97	<i>C</i>	в
200	660	8,1	6,6	6	54	0,6	Δ	0,45	81	60	0,99	<i>C</i>	a

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
201	220	6	10	5	60	0,55	Y	1	10	22	1	B	a
202	127	10	9	6	58	0,6	Y	0,75	12	14,5	0,95	C	б
203	380	5,2	8,0	5	45	0,45	Δ	0,85	25	25,9	0,99	B	в
204	660	6,5	8,5	10	50	0,55	Y	0,65	41,4	51,6	0,96	B	a
205	220	8	7	6,5	56	0,65	Δ	0,95	18	16	0,95	C	б
206	380	5,3	8,6	5	52	0,50	Δ	1	20,5	28	0,99	B	в
207	660	10,6	8,9	4,5	35	0,65	Δ	0,8	55,0	49	1	A	a
208	220	6	8	5	39	0,53	Y	0,7	20	14,5	0,98	B	б
209	220	8,5	5,8	4	42	0,47	Δ	0,65	12	14	0,97	C	в
210	127	5,6	8,2	8	58	0,54	Y	0,9	15	16	0,95	A	a
211	127	5	9	6	44	0,67	Y	0,83	18,5	16,8	0,99	B	б
212	660	6,5	10	8,6	56	0,55	Y	0,95	72,9	50	0,98	A	в
213	660	8	8,9	8,5	46	0,67	Y	0,9	48,4	50	1	A	a
214	220	8,5	5,6	7	54	0,59	Δ	0,85	33	20	0,99	C	б
215	380	7,6	5	5	48	0,6	Y	0,9	24	29	0,96	C	в
216	380	8,5	10	8	52	0,68	Δ	0,89	25	24	0,98	C	a
217	127	8,4	6,4	4,6	50	0,55	Y	0,75	51	13,4	1	B	б
218	127	5,6	4,6	8,5	52	0,48	Δ	0,8	38	16	0,99	C	в
219	220	4,8	7,8	8,5	48	0,57	Δ	0,98	23	16	0,98	C	a
220	660	4,6	8	10	46	0,63	Y	0,83	38	52,7	0,96	B	б
221	380	6	9	6,8	54	0,44	Δ	0,75	29	25	0,99	B	в
222	380	7,2	8	5,8	46	0,54	Y	1	45	25	1	B	a
223	127	5,8	4,5	7,3	56	0,5	Δ	0,85	51	17	0,94	A	б
224	220	7	9	10,5	44	0,59	Y	0,81	23	16	0,95	C	в
225	220	8,3	6,5	5,5	48	0,42	Δ	0,74	19	20	0,98	C	a
226	660	6,8	10	8,8	51	0,62	Δ	0,88	25	42	0,99	B	б
227	660	8,5	6,8	7,6	59	0,45	Y	0,66	78	53	0,93	B	в
228	127	6,3	8,6	4,5	41	0,42	Y	0,76	16	19	0,96	B	a
229	220	6	7	8	57	0,55	Y	0,85	19	18,2	0,98	C	б
230	380	8,6	6,5	10	49	0,53	Δ	0,75	23	25	0,97	C	в
231	380	7,8	4,5	8,5	55	0,58	Δ	0,71	27	26	0,95	B	a
232	127	7	6	9,5	47	0,43	Y	0,96	43	15,1	0,96	A	б
233	220	8	10	9	53	0,49	Δ	0,95	29	17	0,99	C	в
234	660	5,8	6,5	7,5	45	0,66	Δ	0,85	69	53	0,96	C	a
235	380	7,5	9	6,5	51	0,48	Y	0,75	43	34	0,99	B	б
236	220	4,9	10	7,5	43	0,55	Y	0,7	20	16	1	B	в
237	660	4,8	11	6,8	59	0,41	Δ	0,63	54	38	0,95	C	a
238	127	6,3	7,5	9	51	0,54	Y	0,48	28	16	0,96	B	б
239	380	6	6,5	8,5	48	0,48	Δ	0,5	29	37	0,97	C	в
240	660	8,1	6,6	6	54	0,6	Δ	0,45	71	50	0,99	C	a

Окончание

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
241	220	6	10	5	60	0,55	Y	1	10	22	1	B	a
242	127	10	9	6	58	0,6	Y	0,75	12	14,5	0,95	C	б
243	380	5,2	8,0	5	50	0,45	Δ	0,85	15	25,9	0,99	B	B
244	660	6,5	8,5	10	55	0,55	Y	0,65	21,4	51,6	0,96	B	a
245	220	8	7	6,5	45	0,65	Δ	0,95	18	16	0,95	C	б
246	380	5,3	8,6	5	62	0,50	Δ	1	20,5	28	0,99	B	B
247	660	10,6	8,9	4,5	40	0,65	Δ	0,8	55	49	1	A	a
248	220	6	8	5	59	0,53	Y	0,7	22	14,5	0,98	B	б
249	220	8,5	5,8	4	49	0,47	Δ	0,65	12	14	0,97	C	B
250	127	5,6	8,2	8	58	0,54	Y	0,9	15	10	0,95	A	a
251	127	5	9	6	48	0,67	Y	0,83	18,5	16,8	0,99	B	б
252	660	6,5	10	8,6	66	0,55	Y	0,95	52,9	50	0,98	A	B
253	660	8	8,9	8,5	45	0,67	Y	0,9	38,4	60	1	A	a
254	220	8,5	5,6	7	65	0,59	Δ	0,85	33	20	0,99	C	б
255	380	7,6	5	5	58	0,6	Y	0,9	24	29	0,96	C	B
256	380	8,5	10	8	55	0,68	Δ	0,89	15	24	0,98	C	a
257	127	8,4	6,4	4,6	62	0,55	Y	0,75	51	13,4	1	B	б
258	127	5,6	4,6	8,5	53	0,48	Δ	0,8	8	9	0,99	C	B
259	220	4,8	7,8	8,5	58	0,57	Δ	0,98	23	16	0,98	C	a
260	660	4,6	8	10	56	0,63	Y	0,83	38	47	0,96	B	б
261	380	6	9	6,8	48	0,44	Δ	0,75	19	25	0,99	B	B
262	380	7,2	8	5,8	56	0,54	Y	1	15	25	1	B	a
263	127	5,8	4,5	7,3	66	0,5	Δ	0,85	15,1	10,5	0,94	A	б
264	220	7	9	10,5	54	0,59	Y	0,81	23	26	0,95	C	B
265	220	8,3	6,5	5,5	62	0,42	Δ	0,74	19	27	0,98	C	a
266	660	6,8	10	8,8	51	0,62	Δ	0,88	45	52	0,99	B	б
267	660	8,5	6,8	7,6	57	0,45	Y	0,66	18	43	0,93	B	B
268	127	6,3	8,6	4,5	47	0,42	Y	0,76	16	16	0,96	B	a
269	220	6	7	8	55	0,55	Y	0,85	9	22	0,98	C	б
270	380	8,6	6,5	10	59	0,53	Δ	0,75	33	35	0,97	C	B
271	380	7,8	4,5	8,5	68	0,58	Δ	0,71	27	26	0,95	B	a
272	127	7	6	9,5	56	0,43	Y	0,96	43	15,1	0,96	A	б
273	220	8	10	9	53	0,49	Δ	0,95	29	22	0,99	C	B
274	660	5,8	6,5	7,5	45	0,66	Δ	0,85	49	53	0,96	C	a
275	380	7,5	9	6,5	51	0,48	Y	0,75	23	24	0,99	B	б
276	220	4,9	10	7,5	43	0,55	Y	0,7	20	16	1	B	B
277	660	4,8	11	6,8	59	0,41	Δ	0,63	54	58	0,95	C	a
278	127	6,3	7,5	9	61	0,54	Y	0,48	28	13,0	0,96	B	б
279	380	6	6,5	8,5	49	0,48	Δ	0,5	29	27	0,97	C	B
280	660	8,1	6,6	6	54	0,6	Δ	0,45	61	50	0,99	C	a
281													

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Анализ режимов работы трехфазной цепи

Для расчета трехфазных цепей, работающих в установившемся режиме, необходимо знать основные соотношения между токами и напряжениями каждой фазы, линейными и фазными напряжениями и токами, способы эквивалентной замены соединения «звезда» соединением «треугольник» и наоборот. Все соотношения, равно как и способы эквивалентной замены соединения «звезда» соединением «треугольник» и наоборот, приведены в учебниках и рассматриваются в лекционных курсах, однако обучающиеся не всегда имеют достаточное время и навыки использования учебников и материала теоретических курсов, поэтому целью настоящих методических указаний является оказание помощи студентам в правильном выборе соответствующих разделов теоретического курса с последующим использованием основных теоретических соотношений в осуществлении практических расчетов цепей близких к реальным по своей структуре и параметрам.

1. Расчет трехфазной сети без компенсатора реактивной мощности второго приемника

В соответствии с заданием известными являются: суммарная активная мощность второго приемника P_2 , коэффициент мощности этого приемника $\cos \varphi_2$, активные мощности фаз первого приемника P_A, P_B, P_C и действующее значение линейного напряжения.

Для вычисления линейных и фазных токов приемников и источника, прежде всего, необходимо правильно записать законы изменения мгновенных значений линейных и фазных напряжений в функции времени. Необходимо помнить о том, что при равенстве между собой амплитуд линейных напряжений и равенстве между собой амплитуд фазных напряжений их начальные фазы отличаются на 120° . Для дальнейшего выполнения вычислений необходимо записать комплексные действующие значения соответствующих величин.

Второй приемник представляет собой для источника энергии симметричную нагрузку, поэтому действующие значения фазных токов могут быть найдены по известным полным мощностям каждой фазы, которые равны трети полной мощности второго приемника.

Для соединения «звезда» справедливы следующие соотношения:

$$S_{2A} = S_{2B} = S_{2C} = 1/3 S_2, \quad S_2 = P_2 / \cos \varphi_2, \quad Q_2 = S_2 \sin \varphi_2.$$

Для соединения «треугольник»:

$$S_{2AB} = S_{2BC} = S_{2CA} = 1/3 S_2.$$

Действующие значения фазных токов вычисляются по известным мощностям фаз и фазным напряжениям:

– для соединения «звезда», например, ток фазы A :

$$I_A = S_A / U_A;$$

– для соединения «треугольник»:

$$I_{2AB} = S_{AB} / U_{AB}.$$

Линейные токи приемника, соединенного «звездой», равны фазным токам. Линейные токи приемника, соединенного «треугольником», вычисляются по известным уравнениям, записанным на основании первого закона Кирхгофа в комплексной форме:

$$\underline{I}_{2A} = \underline{I}_{2AB} - \underline{I}_{2CA},$$

$$\underline{I}_{2B} = \underline{I}_{2BC} - \underline{I}_{2AB},$$

$$\underline{I}_{2C} = \underline{I}_{2CA} - \underline{I}_{2BC}.$$

В случае симметричной нагрузки при соединении нагрузки «треугольником» действующие значения линейных токов в $\sqrt{3}$ раз больше фазных токов, например

$$I_A = \sqrt{3} I_{AB}.$$

После вычисления действующих значений фазных и линейных токов необходимо записать их комплексные действующие значения для использования при построении векторных диаграмм.

Для вычисления фазных токов первого приемника, коэффициент мощности которого равен единице, необходимо использовать мощность соответствующих фаз.

Ток фазы A первого приемника, например, $I_{1A} = P_{1A} / U_A$. Фазное напряжение фазы A первого приемника определено ранее с учетом того, что фазные сопротивления нагрузки соединены «звездой» с нулевым проводом.

Линейные токи первого приемника равны фазным.

После вычисления фазных токов необходимо записать их комплексные действующие значения по известным комплексным действующим значениям соответствующих фазных напряжений.

Ток нулевого провода первого приемника на основании первого закона Кирхгофа вычисляется из уравнения

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_{1A} + \underline{I}_{1B} + \underline{I}_{1C}.$$

После вычисления линейных токов первого и второго приемников можно вычислить токи источника, комплексные действующие значения которых равны сумме соответствующих значений токов приемников. Ток фазы A источника, например, определяется из уравнения

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{1A} + \underline{I}_{2A}.$$

Коэффициент мощности трехфазной сети, состоящей из двух приемников, определится из формулы

$$\cos \varphi_C = \frac{\sum P_C}{\sqrt{(\sum P_C)^2 + (\sum Q_C)^2}},$$

где $\sum P_C$ – сумма активных мощностей приемников; $\sum Q_C$ – сумма реактивных мощностей приемников.

Полная мощность сети:

$$S_C = \sqrt{(\sum P_C)^2 + (\sum Q_C)^2},$$

или в комплексной форме:

$$\underline{S}_C = \sum P_C + j \sum Q_C.$$

Производителей электрической энергии, как правило, в меньшей степени интересуют коэффициенты мощностей отдельных фаз.

2. Построение векторных диаграмм напряжений и токов источника и приемников

Ранее рекомендовалось записывать значения напряжения и полученные в результате расчетов токов в комплексной форме. При наличии правильной записи токов и напряжений в комплексной форме построение векторной диаграммы не вызывает особых затруднений. Достаточно правильно выбрать масштабы длин векторов напряжений и токов.

Каждый вектор проводится на векторной диаграмме под углом, равным начальной фазе, соответствующей синусоидальной величины. Не следует забывать о том, что начальная фаза мгновенного значения величины равна аргументу соответствующего комплексного действующего значения.

Пример общего вида векторной диаграммы приведен на рис. 2.

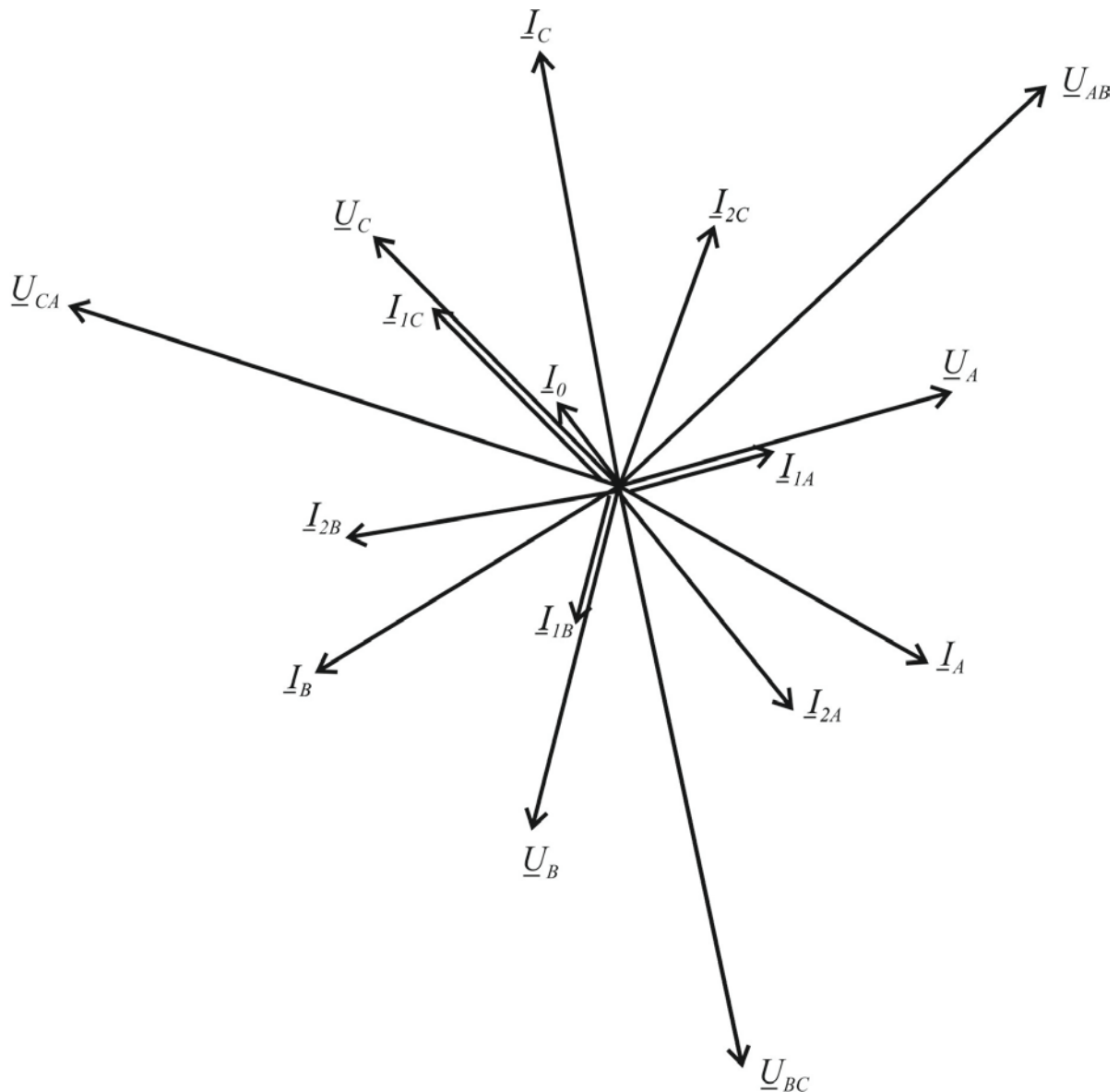


Рис. 2. Пример построения векторной диаграммы напряжений и токов источника и приемников

В том случае, когда заданием предусмотрено соединение нагрузки второго потребителя «треугольником», рекомендуется сначала отдельно построить векторную диаграмму токов и напряжений второго приемника

отдельно, а при построении векторной диаграммы всей сети учесть лишь линейные токи второго приемника.

При анализе векторной диаграммы сети следует обратить внимание на фазовые сдвиги между фазными напряжениями источника и соответствующими линейными токами. Кроме этого следует оценить значение тока нулевого провода I_0 и его соотношение с фазными токами первого приемника и линейными токами источника.

3. Определение схемы трехфазной сети с отключенным компенсатором

Для представления развернутой схемы трехфазной сети необходимо, прежде всего, вычислить значения фазных сопротивлений приемников. Внутренние сопротивления источника заданы.

Сопротивления резисторов фаз первого приемника определяются мощностью фазной нагрузки и фазным напряжением. В частности, сопротивление фазы A первого приемника, исходя из формулы активной мощности для резистивной нагрузки $P_A = U_A^2/R_A$, определится по формуле

$$R_A = U_A^2/P_A.$$

Полные сопротивления фаз второго приемника легко определить, если полная мощность второго приемника записана в комплексной форме $\underline{S}_2 = S_2 e^{j\varphi_2}$.

Тогда для сопротивления «звезда»

$$\underline{Z}_A = 3U_A^2/\underline{S}_2^*.$$

В случае соединения «треугольник»

$$\underline{Z}_{AB} = 3U_{AB}^2/\underline{S}_2^*.$$

Очевидно то, что фазные сопротивления второго приемника индуктивно-резистивного характера, поэтому из комплексной формы записи сопротивления определяются значения эквивалентных активного и реактивного сопротивлений. По значению последнего вычисляется индуктивность фазной нагрузки. Общий вид принципиальной схемы приведен на рис. 3.

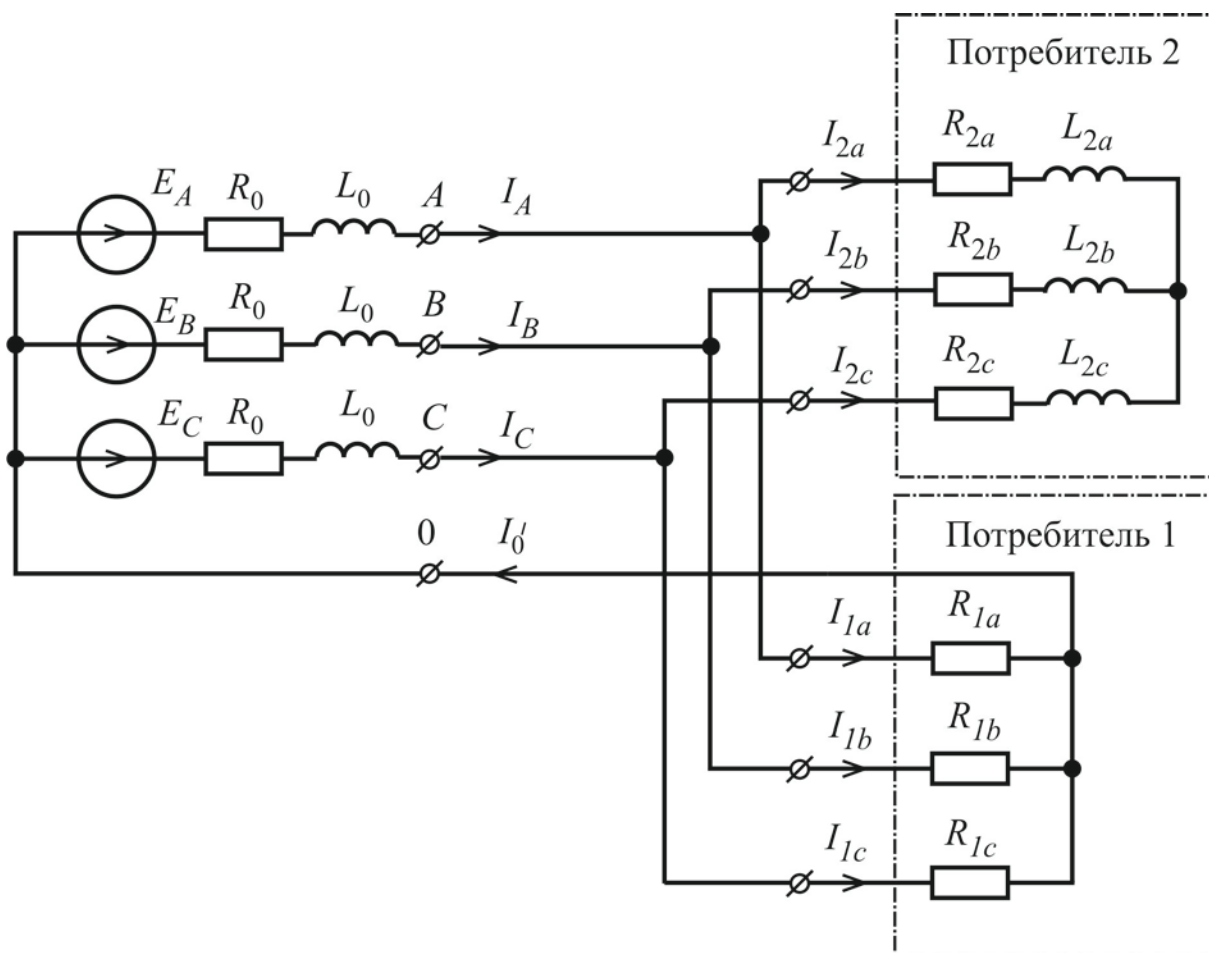


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема трехфазной сети с отключенным компенсатором

4. Расчет параметров компенсатора

Для обеспечения эффективной работы источника и устройств передачи электроэнергии к значению коэффициента мощности предъявляются жесткие требования. Ранее уже говорилось о том, что в реальных условиях работы предприятий коэффициент мощности $\cos\varphi$ самого предприятия в целом, как правило, ниже допустимого значения. Для улучшения такого важного показателя, как коэффициент мощности потребителя, используют устройства компенсации реактивной мощности. Эту роль могут выполнять электромашинные компенсаторы или устройства, базирующиеся на использовании батарей конденсаторов большой емкости. Сами компенсаторы имеют внутренние дополнительные потери мощности, но положительный результат от их использования подтверждается практикой.

В задании требуется подобрать параметры компенсатора таким образом, чтобы результирующий коэффициент мощности второго

приемника при включенном компенсаторе не выходил бы за пределы допустимого значения, указанного в таблице вариантов. При этом необходимо учесть дополнительную мощность потерь компенсатора.

Активная мощность, рассеиваемая вторым потребителем, определяется по уравнению

$$P_2 = S_2 \cos \varphi_2.$$

Реактивная мощность второго потребителя равна

$$Q_2 = S_2 \sin \varphi_2.$$

При подключенном компенсаторе суммарная активная мощность второго приемника составит

$$P_{2к} = P_k + P_2.$$

Суммарная реактивная мощность равна

$$Q_{2к} = Q_k + Q_2.$$

Допустимое значение коэффициента мощности определяется по формуле

$$\cos \varphi_{2к} = \frac{P_{2к}}{\sqrt{(P_{2к})^2 + (Q_{2к})^2}},$$

откуда достаточно легко можно получить значение $Q_{2к}$, при котором обеспечивается требуемое значение $\cos \varphi_{2к}$. Таким образом:

$$Q_k = Q_{2к} - Q_2.$$

По заданной ранее мощности потерь компенсатора P_k и найденной реактивной мощности Q_k можно определить параметры эквивалентной схемы замещения компенсатора. Для упрощения дальнейших расчетов рекомендуется определить параметры последовательной схемы замещения фазных нагрузок, соединенных «звездой».

Тогда $\underline{S}_k = P_k + jQ_k$, и аналогично тому, как это уже выполнялось для определения параметров элементов схемы замещения второго приемника, соединенного «звездой»:

$$\underline{Z}_{кА} = \underline{Z}_{кВ} = \underline{Z}_{кС} = 3U_A^2 / \underline{S}_k^*.$$

Действительные части полных комплексных сопротивлений дадут значения сопротивлений резисторов, а мнимые – реактивные сопротивления конденсаторов.

По значениям последних вычисляются емкости фазных конденсаторов, которые обеспечивают заданную величину коэффициента

мощности второго потребителя, если в пределах его подключен компенсатор.

Таким образом, общий вид эквивалентной схемы компенсатора будет выглядеть так, как показано на рис. 4.

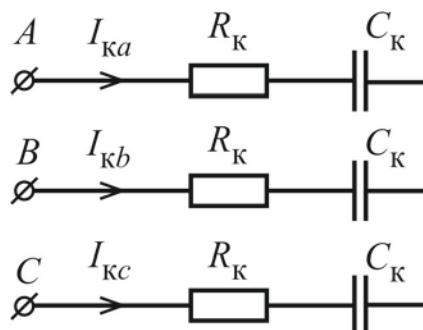


Рис. 4. Эквивалентная схема компенсатора реактивной мощности

5. Расчет трехфазной сети при улучшенном коэффициенте мощности второго приемника

Из практики известно, что компенсаторы включаются параллельно с той нагрузкой, характер которой и требует его подключения. В этой ситуации подключение компенсатора не окажет влияния на токи самого второго потребителя. Тем более такое подключение не скажется на режиме работы первого потребителя.

Таким образом, результаты предыдущих вычислений могут быть использованы в дальнейшем.

По известной схеме замещения компенсатора легко вычислить комплексные значения токов компенсатора. Ток фазы *C* компенсатора, например, определяется по формуле

$$\underline{I}_{кC} = \underline{S}_k / 3 \underline{U}_C.$$

Компенсатор для сети представляет собой симметричную нагрузку, поэтому токи других фаз могут быть записаны по найденному значению одного из токов.

Линейные токи второго потребителя с включенным компенсатором равны суммам соответствующих токов второго потребителя и компенсатора. Ток фазы *B*, например, определяется по уравнению

$$\underline{I}_{2kB} = \underline{I}_{2B} + \underline{I}_{кB}.$$

Аналогично вычисляются и другие линейные токи. Для облегчения построения векторных диаграмм все вновь найденные токи должны быть записаны в комплексной форме.

6. Построение векторных диаграмм при подключенном компенсаторе

Построение результирующей векторной диаграммы по известным комплексным действующим значениям токов и напряжений не представляет особого труда, но такая векторная диаграмма из-за обилия векторов может потерять наглядность.

Для наглядности предлагается построить три векторные диаграммы:

а) векторную диаграмму токов и напряжений второго потребителя и компенсатора;

б) векторную диаграмму напряжений и линейных токов источника, первого потребителя и суммарных линейных токов второго потребителя с подключенным компенсатором;

в) векторную диаграмму фазного напряжения и всех линейных токов одной из фаз в зависимости от номера варианта.

Такой набор векторных диаграмм позволит понять основное назначение компенсатора и его роль в трехфазной сети.

При анализе векторных диаграмм следует особое внимание обратить на угол фазового сдвига между фазными напряжениями и соответствующими линейными токами источника. Сравнить их с соответствующими углами на векторной диаграмме трехфазной сети, работающей без компенсатора во втором потребителе. Для полной наглядности следует начертить результирующую развернутую схему трехфазной сети с подключенным компенсатором.

7. Вычисление результирующего коэффициента мощности всей цепи с подключенным компенсатором

Вычисление результирующего коэффициента мощности всей сети не связано с какими-то трудностями, так как для этого достаточно вычислить суммарную полную мощность цепи, включающую первый, второй потребители и компенсатор.

$$\underline{S} = \underline{S}_1 + \underline{S}_2 + \underline{S}_k,$$

где \underline{S} – комплексная полная мощность источника; $\underline{S}_1 = P_{1A} + P_{1B} + P_{1C}$ – полная мощность первого потребителя; \underline{S}_2 – полная мощность второго

потребителя без компенсатора; $\underline{S}_k = P_k + jQ_k$ – полная мощность компенсатора.

Комплексная полная мощность первого потребителя и второго потребителя с компенсатором может быть записана в показательной форме:

$$\underline{S} = S e^{j\varphi},$$

и по известному аргументу комплекса полной мощности определяется коэффициент мощности.

8. Вычисление фазной ЭДС генератора

В реальных условиях значение фазной ЭДС генератора больше соответствующего фазного напряжения сети. Это объясняется не только тем, что обмотки генератора имеют конечное омическое (резистивное) сопротивление или реактивное сопротивление, обусловленное потоком рассеивания, но и наличием явления называемого размагничивающим действием реакции якоря, смысл которого объясняется в теории синхронных генераторов.

В настоящей курсовой работе полное внутреннее сопротивление одной фазы генератора задано в форме активного сопротивления R_0 и реактивного сопротивления X_0 . Таким образом, полное внутреннее сопротивление фазы генератора вычисляется в комплексной форме:

$$\underline{Z}_0 = R_0 + jX_0.$$

Фазное сопротивление определено заданием и ранее записано в комплексной форме. В соответствии со вторым законом Кирхгофа для фазы A , например

$$\underline{E}_A = \underline{Z}_0 \underline{I}_A.$$

Используя ранее полученные комплексные действующие значения токов, можно вычислить фазные ЭДС при подключенном компенсаторе второго потребителя или отсутствии компенсации второго приемника.

Полученные величины фазных ЭДС будут использоваться при рассмотрении переходных процессов в трехфазной цепи.

9. Расчет переходного процесса в трехфазной цепи

Переходные процессы, т.е. процессы перехода цепи из одного устойчивого энергетического состояния в другое устойчивое энергетическое состояние, обусловлены переключениями различного рода

или аварийными ситуациями. Динамика такого перехода может привести к дополнительным вторичным перенапряжениям в цепи или резким скачкам тока, что неблагоприятно сказывается на режиме работы различной аппаратуры. Поэтому анализ переходных процессов в трехфазных цепях, как и в других цепях, имеет важное практическое значение.

В курсовой работе предлагается рассмотреть упрощенный вариант переходного процесса лишь в одной из фаз. Для упрощения цепи общие зажимы фазных сопротивлений второго потребителя и компенсатора условно соединяются нулевым проводом с соответствующим зажимом генератора.

В том случае, если фазные сопротивления нагрузки второго потребителя соединены «треугольником», то для упрощения анализа необходимо заменить такое соединение эквивалентным соединением «звезда» на частоте 50 Гц.

В общем случае для такой эквивалентной замены можно воспользоваться известными уравнениями связывающие сопротивления «треугольника» и эквивалентной «звезды»:

$$\underline{Z}_A = \frac{\underline{Z}_{AB}\underline{Z}_{CA}}{\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{CA}}; \underline{Z}_B = \frac{\underline{Z}_{BC}\underline{Z}_{AB}}{\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{CA}}; \underline{Z}_C = \frac{\underline{Z}_{CA}\underline{Z}_{BC}}{\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{CA}}.$$

В случае симметричной нагрузки $\underline{Z}_{AB} = \underline{Z}_{BC} = \underline{Z}_{CA}$, поэтому

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = \frac{1}{3} \underline{Z}_{AB}.$$

При эквивалентной замене для правильного начертания схемы цепи необходимо вычислить активное сопротивление и индуктивность катушки, которые при их последовательном соединении обеспечат на частоте 50 Гц соответствующее фазное сопротивление.

Для правильного определения закона изменения одной из величин в функции времени при переходном процессе необходимо начертить принципиальную схему цепи одной из фаз с учетом величины ранее вычисленной фазной ЭДС.

Возможно три варианта (рис. 5) схем цепей, переходной процесс в которых подлежит рассмотрению.

На рис. 5,а изображен общий вид схемы цепи при подключении приемников к источнику питания. На рис. 5,б представлена схема цепи для расчета переходного процесса в цепи, вызванного подключением компенсатора в сеть. На рис. 5,в изображена схема цепи для расчета переходного процесса, вызванного частичным коротким замыканием фазной нагрузки, эквивалентным уменьшению фазного сопротивления в два

раза. Частичные короткие замыкания возникают обычно при выходе из строя трехфазных двигателей.

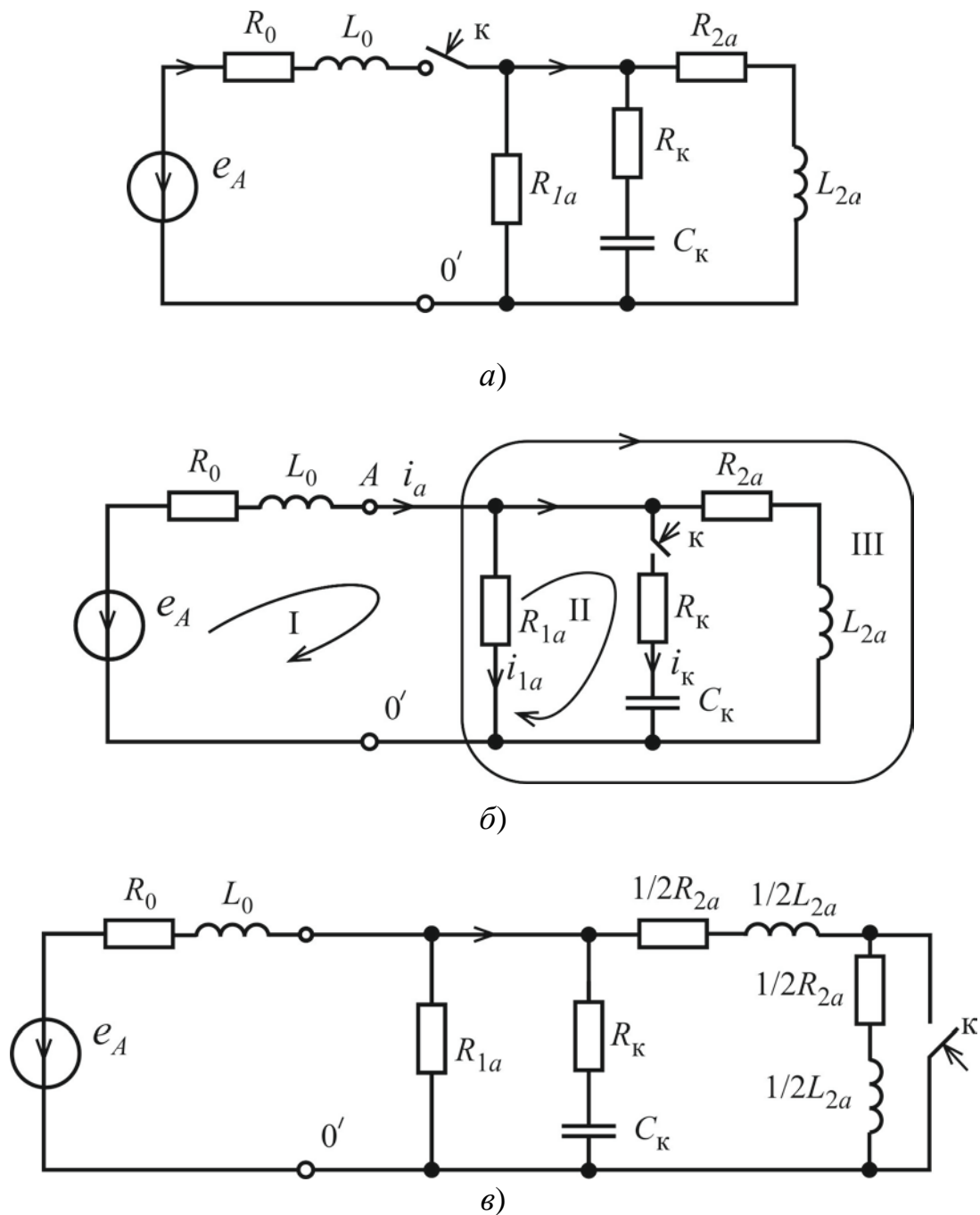


Рис. 5. Варианты схем для анализа переходных процессов

Для анализа переходных процессов в электрических цепях при мгновенных переключениях обычно используют или классический, или операторный методы расчета. В дальнейшем даются лишь некоторые рекомендации для правильного нахождения закона изменения одной из величин в функции времени.

Пояснения и рекомендации к использованию классического метода расчета переходных процессов.

Классический метод расчета заключается в составлении системы дифференциальных уравнений электрического равновесия цепи на основании первого и второго законов Кирхгофа и последующим нахождением решения этой системы.

Для правильной записи системы дифференциальных уравнений необходимо, прежде всего, задаться положительным направлением токов ветвей и положительным направлением обхода выбранных независимых контуров. Контур рекомендуется выбирать таким образом, чтобы в них входило минимальное количество реактивных элементов. После чего составляются уравнения по первому и второму законам Кирхгофа в дифференциальной форме.

Ниже приводится система дифференциальных уравнений для схемы, изображенной на рис. 5,б. Следует напомнить о том, что система уравнений составляется для состояния цепи после коммутации $t(0_+)$. Для рассматриваемого случая при замкнутом ключе «К»

$$\begin{cases} -i_k + i_{1A} + i_k + i_{2A} = 0 \\ R_0 i_A + L_0 \frac{di_A}{dt} + i_{1A} R_{1A} = e_A \\ -R_{1A} i_{1A} + R_k i_k + \frac{1}{C} \int i_k dt = 0 \\ -R_k i_k - \frac{1}{C} \int i_k dt + R_{2A} i_{2A} + L_{2A} \frac{di_{2A}}{dt} = 0. \end{cases}$$

Предполагается во всех случаях, что переключения в цепи происходят в момент времени, равным нулю.

Решением данной системы является совокупность токов изменяющихся во времени по закону:

$$i(t) = i_{\text{пр}}(t) + \sum_{k=1}^n A_k e^{p_k t},$$

где $i_{\text{пр}}(t)$ – принужденная составляющая искомого тока ($t \rightarrow \infty$); n – порядок характеристического уравнения; p_k – k -й корень характеристического уравнения; A_k – k -я постоянная, значение которой находится из граничных условий.

На первом этапе расчета следует вычислить и записать в функции времени принужденную составляющую искомой величины, для чего могут быть использованы результаты предыдущих расчетов.

На втором этапе записывается характеристическое уравнение системы, и находятся его корни p_1, p_2, p_3 и т.д.

В электротехнике используются два способа записи характеристического уравнения.

Первый способ заключается в записи матрицы коэффициентов при переменных в так называемой операторной форме. При этом операция дифференцирования заменяется умножением переменной на оператор p , а операция интегрирования делением переменной на оператор p . Тогда искомая матрица записанной ранее системы будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{vmatrix} -1 & 1 & 1 & 1 \\ R_0 + pL_0 & R_{1A} & 0 & 0 \\ 0 & -R_{1A} & R_k + \frac{1}{pc} & 0 \\ 0 & 0 & -R_k - \frac{1}{pc} & R_{2A} + pL_{2A} \end{vmatrix}.$$

Записав определитель этой матрицы в общем виде и приравняв его нулю, получают характеристическое уравнение системы.

Второй способ заключается в следующем: из схемы цепи, соответствующей ее состоянию после коммутации, исключается источник питания путем его замены внутренним сопротивлением; обрывается любая ветвь цепи и записывается входное или эквивалентное сопротивление цепи относительно полученных зажимов в комплексной форме в функции $(j\omega)$. В полученном выражении $(j\omega)$ заменяется оператором p , и оно приравнивается нулю.

Для приведенного выше примера характеристическое уравнение будет выглядеть следующим образом:

$$R_0 + pL_0 + \frac{1}{\frac{1}{R_{1A}} + \frac{1}{R_k + \frac{1}{pc}} + \frac{1}{R_{2A} + pL_{2A}}} = 0.$$

После несложных алгебраических преобразований получают характеристическое уравнение в форме, удобной для нахождения корней. Очевидно то, что в приведенном примере будет иметь место уравнение третьего порядка.

Наиболее сложным в расчете переходных процессов является нахождение постоянных интегрирования A_1, A_2, A_3 и т.д. искомой

величины. Для их вычисления используется система уравнений следующего вида (для нахождения тока i_{1A} , например): при $n = 3$:

$$\begin{cases} -i_{1A}(0) - i_{1Aпр}(0) = A_1 + A_2 + A_3 \\ \frac{di_{1A}(0)}{dt} - \frac{di_{1Aпр}(0)}{dt} = p_1 A_1 + p_2 A_2 + p_3 A_3 \\ \frac{d^2 i_{1A}(0)}{dt^2} - \frac{d^2 i_{1Aпр}(0)}{dt^2} = p_1^2 A_1 + p_2^2 A_2 + p_3^2 A_3. \end{cases}$$

В приведенной системе известными являются ранее найденные корни характеристического уравнения p_1, p_2, p_3 . Не составляет труда нахождение принужденного значения производных искомой величины при $t = 0$. Ведь ранее был найден закон изменения принужденного значения искомой величины в функции времени.

Значения $i_{1A}(0)$, $di_{1A}(0)/dt$ и $d^2 i_{1A}(0)/dt^2$ находятся из системы дифференциальных уравнений, записанных для момента времени $t = 0_+$ с использованием законов коммутации. Для этого необходимо рассчитать токи индуктивностей и напряжений на конденсаторах для состояния ее перед коммутацией. Следует отметить, что для этого можно воспользоваться результатами предыдущих расчетов.

Получив значения $i_L(0_-)$ и $u_C(0_-)$ на основании законов коммутации из системы уравнений (при необходимости путем дополнительного дифференцирования уравнений), можно найти значения искомой величины и ее производных при $t = 0_+$.

Общий вид системы уравнений при $t = 0_+$ приведен ниже:

$$\begin{cases} -i_A(0) + i_{1A}(0) + i_k(0) + i_{2A}(0) = 0 \\ R_0 i_A(0) + L_0 \frac{di_A(0)}{dt} + i_{1A}(0) R_{1A} = e_A(0) \\ -R_{1A} i_{1A}(0) + R_k i_k(0) + u_C(0) = 0 \\ -R_k i_k(0) - u_C(0) + R_{2A} i_{2A}(0) + L_{2A} \frac{di_{2A}(0)}{dt} = 0. \end{cases}$$

На основании законов коммутации в приведенной системе известными будут являться токи ветвей, содержащих индуктивности и напряжение на конденсаторе, т.е. $i_A(0)$; $i_{2A}(0)$; и $u_C(0)$ и, естественно, $e_A(0)$. Решая совместно первое и третье уравнения, можно найти $i_{1A}(0)$ и $i_k(0)$; из второго уравнения находится значение $di_A(0)/dt$; из четвертого

уравнения – $di_{2A}(0)/dt$. После дополнительного дифференцирования уравнений при необходимости определяются и другие величины.

Подставляя полученные значения искомой величины и ее производных в систему уравнений для вычисления постоянных интегрирования A_1, A_2, A_3 , находят решение системы уравнений и записывают искомую величину в функции времени.

О способе нахождения постоянных A_1, A_2, A_3 более подробную информацию можно найти в учебниках или в теоретическом курсе лекций.

Пояснения и рекомендации к использованию операторного метода расчета переходных процессов.

Применение операторного метода расчета переходных процессов не всегда облегчает задачу нахождения искомой величины. Основными этапами расчета являются:

а) расчет цепи до коммутации для определения значений токов индуктивностей и напряжений на зажимах конденсаторов до замыкания ключа (момент времени $t (0_+)$);

б) запись параметра источника питания в операторной форме.

При выполнении курсовой работы не следует забывать о том, что фазная ЭДС изменяется по синусоидальному закону во времени. Для записи ее изображения следует воспользоваться таблицей типовых изображений;

в) составление операторной схемы замещения электрической цепи;

г) расчет цепи в общем виде с целью получения изображения искомой величины;

д) разложение полученного выражения на простые слагаемые дроби;

е) переход от изображения искомой величины к ее оригиналу с использованием таблиц оригиналов и изображений. Наиболее сложным при таком подходе является приведение изображения к виду, удобному для разложения на простые дроби и само разложение.

Примечание. Решить систему дифференциальных уравнений, равно как и найти корни характеристического уравнения, можно с помощью персональных компьютеров.

10. Построение графика изменения мгновенного значения найденной величины во времени

По полученному закону изменения искомой величины во времени следует построить временную диаграмму. Для этого необходимо правильно выбрать масштабы изображения. Желательно масштаб времени

выбрать таким образом, чтобы на графике получили изображение не менее трех периодов принужденного значения, или чтобы в представленном отрезке времени переходный процесс практически закончился.

11. Анализ результатов расчетов

В задании уже даны рекомендации о том, на что необходимо обратить внимание при анализе результатов расчетов. При анализе результатов расчета переходных процессов рекомендуется обратить внимание на соотношения максимальных значений величины, вызванных переходным процессом, и принужденных значений, а также на длительность переходного процесса.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Цель курсовой работы	5
Исходные условия	5
Задание	6
Таблица вариантов	7
Методические указания по выполнению курсовой работы.....	15

Учебное издание

Исследование трехфазных электрических цепей в стационарном и переходном режимах

Составители:

Ашанин Василий Николаевич,
Горячев Владимир Яковлевич

Редактор *Е. В. Шмелева*
Технический редактор *Н. В. Иванова*
Компьютерная верстка *Н. В. Ивановой*

Подписано в печать 19.06.2020.
Формат 60×84¹/₁₆. Усл. печ. л. 1,86.
Тираж 60. Заказ № 145.

Издательство ПГУ
440026, Пенза, Красная, 40.
Тел./факс: (8412) 56-47-33; e-mail: iic@pnzgu.ru