



**Некоммерческое
акционерное
общество**

**АЛМАТИНСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ЭНЕРГЕТИКИ И
СВЯЗИ**

Кафедра «Электрические машины
и электропривод»

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Методические указания по выполнению расчетно - графических работ
для студентов специальности 5В071700 - Теплоэнергетика

Алматы 2018

СОСТАВИТЕЛИ: Алдибеков И.Т., Жаркымбекова М.Б., Даркенбаева Э.Б. Электротехника и электроника. Методические указания по выполнению расчетно - графических работ для студентов специальности 5В071700 - Теплоэнергетика. - Алматы: АУЭС, 2018. – 38 с.

Приводятся задания и методические указания к расчетно – графическим работам по курсу «Электротехника и электроника» для тем: «Расчет линейных цепей постоянного тока», «Расчет линейной электрической цепи однофазного синусоидального тока со смешанным соединением приемников», «Расчет трехфазной цепи синусоидального тока», «Расчёт параметров и характеристик трёхфазного трансформатора».

Расчетно – графические задания предназначены для студентов второго курса, обучающихся в бакалавриате по специальности 5В071700 – Теплоэнергетика.

Ил. 34, табл. 10, библи. – 5 назв.

Рецензент: доцент кафедры ЭС и ЭЭС Б.К. Курпенов

Печатается по плану издания некоммерческого акционерного общества «Алматинский университет энергетики и связи» на 2018 г.

© НАО «Алматинский университет энергетики и связи», 2018г.

Введение

Методические указания к выполнению расчетно-графических работ разработаны в соответствии с рабочей программой для студентов специальности 5В071700 – Теплоэнергетика по дисциплине «Электротехника и электроника».

Целью РГР является развитие инженерного мышления, приобретение знаний, необходимых для изучения специальных дисциплин, связанных с проектированием и эксплуатацией электротехнического оборудования.

В процессе выполнения РГР студент осваивает основные свойства и характеристики электрических цепей, различает принципы действия, конструктивные и эксплуатационные особенности электрических машин и приводов, изображает электрические схемы по требованиям к оформлению технической документации и изображения электротехнических систем в соответствии с ГОСТ.

В результате выполнения РГР студент *получает практическое представление* о методах анализа электрических и магнитных цепей, принципах действия, эксплуатационных особенностях, выбора электромагнитных устройств, электрических машин и приборов, принципах действия и возможностях применения электроизмерительных приборов и способах измерения электрических величин, о методах анализа работы электрических цепей и выполнения простейших оценочных электромагнитных расчетов, расчета электротехнических схем и расчета основных характеристик электротехнических устройств, выбора средств и методов расчета, измерений, оценки достоверности получаемых результатов. В методическом указании приводятся варианты заданий, требования к их выполнению, оформлению и защите работы, краткие теоретические сведения и примеры расчета отдельных пунктов задания, а также рекомендуемая литература.

Требования к выполнению, оформлению и защите работы:

- при выполнении семестровой работы используется лекционный материал, учебники по курсу теории электрических цепей и методические указания по выполнению семестровых работ. Список рекомендуемой литературы приводится в конце данного методического указания;
- задание (номер варианта) на семестровую работу выдается индивидуально каждому студенту преподавателем;
- РГР состоит из расчетно-пояснительной записки и графической части.
- пояснительная записка оформляется на бумаге стандартного формата А4; В начале пояснительной записки дается номер варианта и исходные данные;
- электрические схемы изображаются по условными обозначениями;
- каждый пункт расчета озаглавляется. За формулами в общем виде следуют расчеты с числовыми данными, сопровождаемые поясняющим текстом и единицами измерения. Однотипные расчеты и их результаты

следует сводить в таблицы;

- графики и диаграммы выполняются на миллиметровой бумаге карандашом с указанием масштаба. Все рисунки нумеруются в пределах работы.

1 Расчетно - графическая работа №1. Расчет линейных цепей постоянного тока

Задание по РГР №1.

1. Согласно варианту выберите схему электрической цепи (рисунки 1.1...1.10) и ее параметров (таблицы 1.1 и 1.2).

2. На основании законов Кирхгофа составьте систему уравнений для расчета токов во всех ветвях схемы.

3. Определите токи в ветвях цепи по методу контурных токов и проверьте достоверность расчета по первому и второму законам Кирхгофа.

4. Определите токи во ветвях цепи по методу двух узлов и проверьте достоверность расчета по первому и второму законам Кирхгофа.

5. Составьте баланс мощностей для заданной цепи.

6. Постройте потенциальную диаграмму для контура цепи, содержащего два источника ЭДС. Сопоставить результаты расчётов двумя методами.

Таблица 1.1- Параметры цепи

Вариант Параметр	Последняя цифра зачётной книжки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
№ рисунка	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	1.10
$E_1, В$	100	120	250	200	150	180	200	150	250	100
$E_2, В$	180	120	200	180	150	150	100	180	200	150

Таблица 1.2 - Параметры цепи

Вариант Параметр	Предпоследняя цифра зачётной книжки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$R_1, Ом$	30	80	60	30	20	100	60	90	30	70
$R_2, Ом$	70	40	20	80	50	80	50	70	80	50
$R_3, Ом$	90	60	50	60	70	20	20	90	60	30

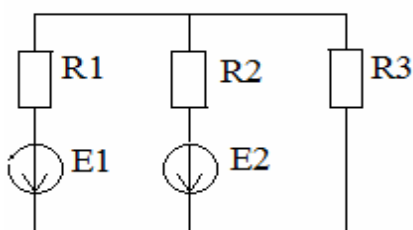


Рисунок 1.1

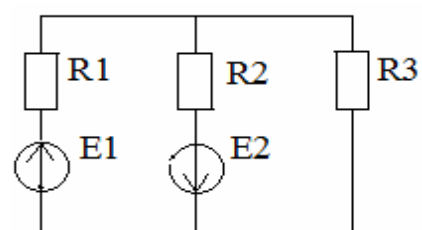


Рисунок 1.2

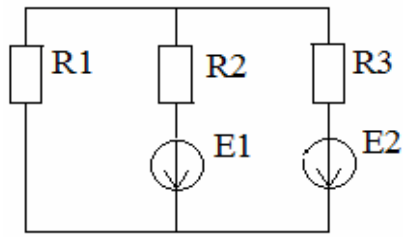


Рисунок 1.3

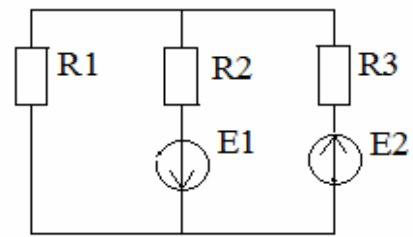


Рисунок 1.4

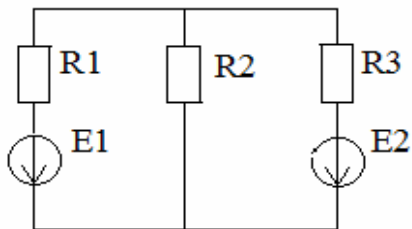


Рисунок 1.5

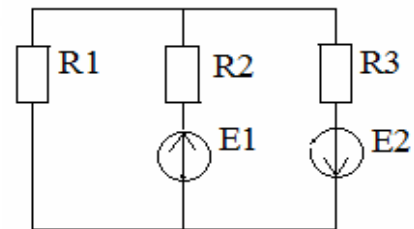


Рисунок 1.6

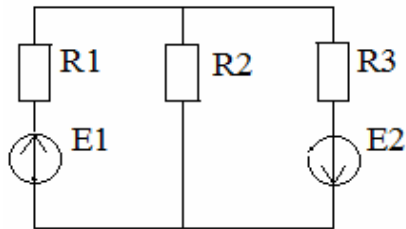


Рисунок 1.7

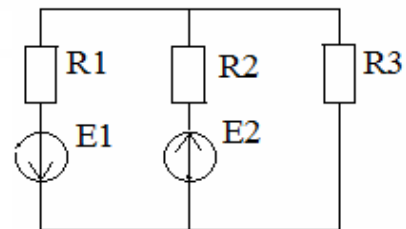


Рисунок 1.8

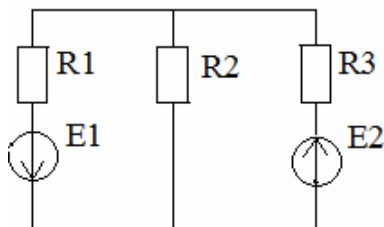


Рисунок 1.9

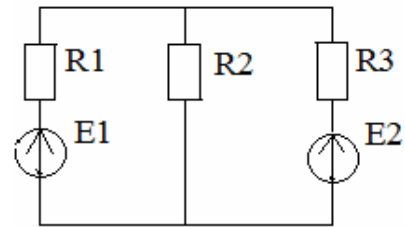


Рисунок 1.10

2 Расчетно - графическая работа №2. Расчет линейной электрической цепи однофазного синусоидального тока со смешанным соединением приемников

Задание по РГР №2.

В электрической цепи со смешанным соединением приемников (рисунки 2.1-2.10) действует источник синусоидального напряжения $u = U_m \sin 2\pi ft$. Действующее значение напряжения U , частота f и параметры цепи приведены в таблицах 2.1, 2.2, 2.3.

Выполнить следующее:

а) рассчитать индуктивные X_L и емкостные X_C сопротивления, комплексные сопротивления каждой ветви и эквивалентное комплексное сопротивление всей цепи;

б) рассчитать комплексные действующие значения токов во всех ветвях и напряжений на элементах цепи, записать выражения для их мгновенных значений, проверить достоверность расчета по законам Кирхгофа;

в) составить баланс мощностей;

г) построить векторную диаграмму токов и напряжений.

Таблица 2.1 – Параметры цепи

Год поступления	Последняя цифра зачётной книжки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Нечётный № рисунка	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	2.10
Чётный № рисунка	0	9	8	7	6	5	4	3	2	1
	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	2.10
$U, В$	100	120	90	80	60	110	70	115	50	85
$R_1, Ом$	90	-	130	85	90	40	120	100	110	40
$R_2, Ом$	110	120	150	-	110	-	95	120	90	130
$R_3, Ом$	60	80	90	100	-	100	50	95	80	100

Таблица 2.2 – Параметры цепи

Год поступления	Предпоследняя цифра зачётной книжки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Нечётный	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Чётный	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$f, Гц$	600	700	800	900	1000	700	900	600	1000	800
$L_1, мГн$	35	25	20	15	10	30	20	40	15	30
$L_2, мГн$	40	20	15	18	20	25	10	30	20	25
$L_3, мГн$	30	35	25	10	15	18	15	35	10	20

Таблица 2.3 – Параметры цепи

Год поступления	Первая буква фамилии									
	АЯ	УЮ Ф	КХ	БЛЦ	ВМЧ	ТЭИ	ЖСЗ	ДО Щ	ЕПР	ГН Ш
Нечётный										
Чётный	ГН Ш	АЯ	ЕПР	УЮ Ф	ДО Щ	КХ	БЛЦ	ЖСЗ	ТЭИ	ВМЧ
$C_1, мкФ$	2	3,5	3	1,5	2,8	2	2,2	2,5	1,8	1,5
$C_2, мкФ$	1,5	2,5	2	1,8	2	2,5	3,2	2	1,5	2,5
$C_3, мкФ$	2,5	2	1,5	2,5	3	3,5	1,5	2,8	2	3

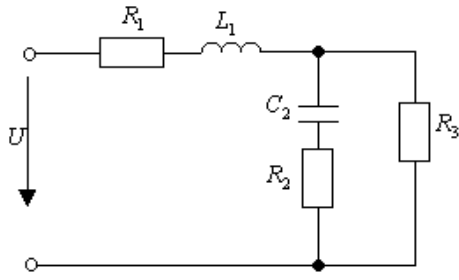


Рисунок 2.1

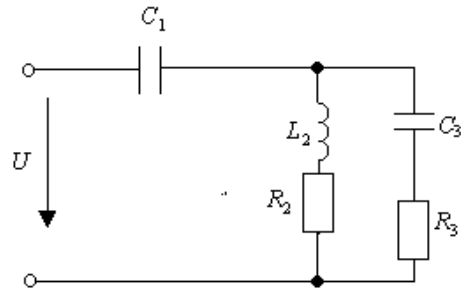


Рисунок 2.2

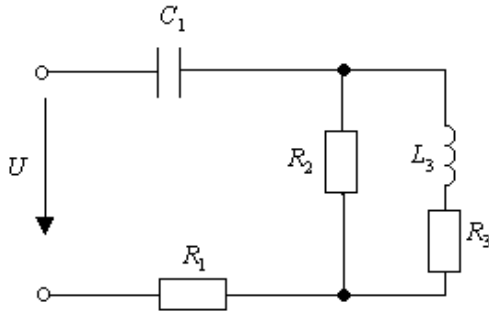


Рисунок 2.3

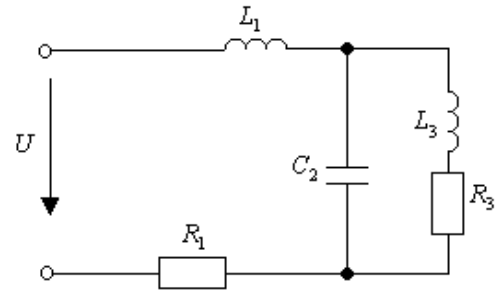


Рисунок 2.4

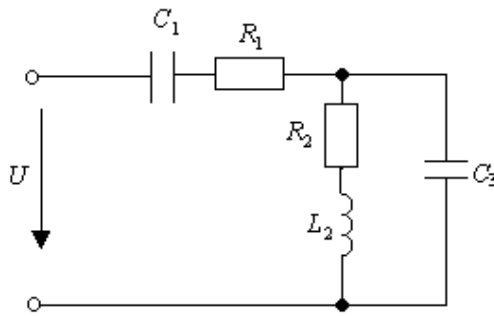


Рисунок 2.5

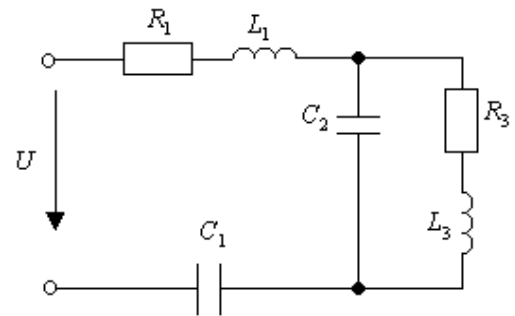


Рисунок 2.6

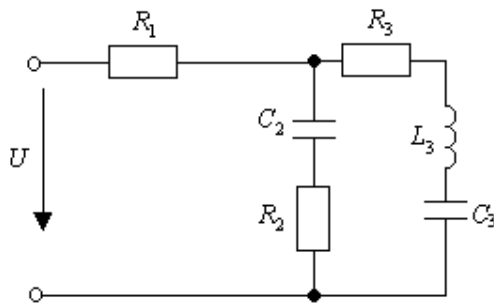


Рисунок 2.7

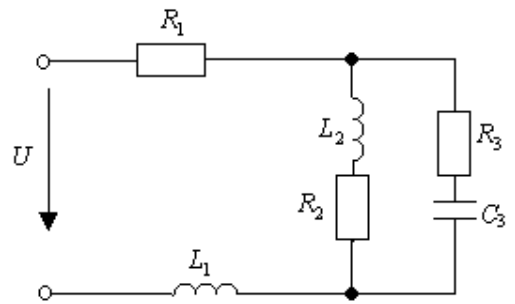


Рисунок 2.8

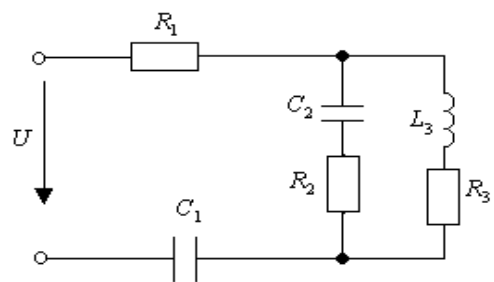


Рисунок 2.9

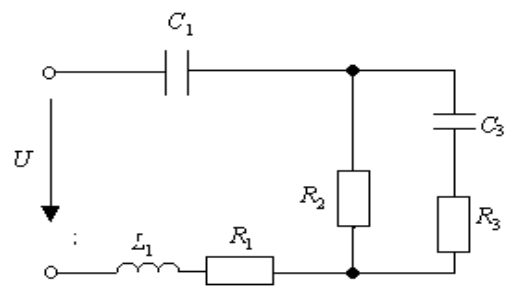


Рисунок 2.10

3 Расчетно - графическая работа №3. Расчет трехфазной цепи синусоидального тока

Задания и указания по выбору варианта.

Цель задания – закрепление приобретенных навыков по анализу электрического состояния трехфазных цепей переменного тока. Вариант задания выбирается студентом по номеру в журнале учебной группы из таблицы 1.

К трехфазной цепи с линейным напряжением \dot{U}_a (рисунок 1) подключен трехфазный симметричный приемник, соединенный по схеме «треугольник», и группа однофазных приемников, соединенных по схеме «звезда» с нейтральным проводом. Сопротивление нейтрального провода пренебрежительно мало. Прочерк в задании значения сопротивления в фазе приемника, соединенного по схеме «звезда», означает отсутствие этого сопротивления, т.е. величина сопротивления равна бесконечности (разрыв цепи).

Определить:

- 1) Токи в однофазных приёмниках соединённых по схеме «звезда».
- 2) Фазные и линейные токи приёмников, соединенных по схеме «треугольник».

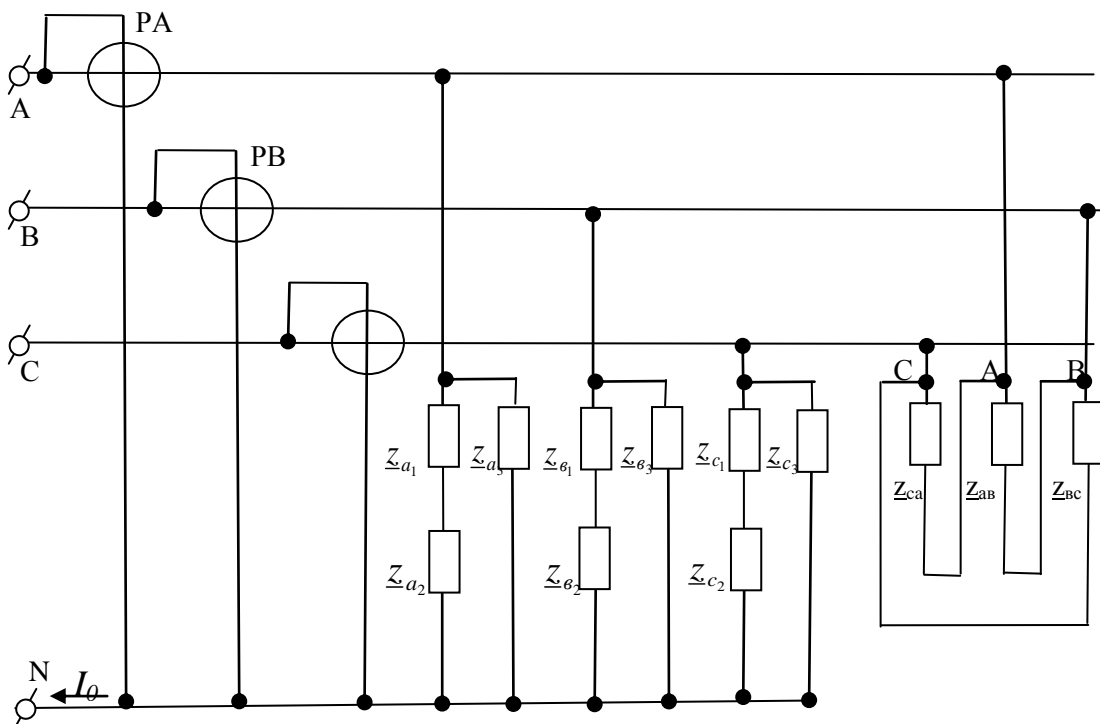


Рисунок 3.1 - Трехфазная электрическая цепь

- 3) Показания ваттметров и активную мощность трёхфазной цепи.
- 4) Построить векторные диаграммы напряжений и токов и по ним

определить токи в линейных проводах и ток в нейтральном проводе.

Векторные диаграммы напряжений и токов для соединения «звезда» и «треугольник» строятся в одной системе координатных осей.

Таблица 3.1 – Исходные данные для расчета по вариантам

№ вар	U _л , В	Соединение потребителей по схеме «звезда»									Соединение потребителей по схеме «треугольник»		
		z_{a1} (Ом)	z_{a2} (Ом)	z_{a3} (Ом)	z_{e1} (Ом)	z_{e2} (Ом)	z_{e3} (Ом)	z_{c1} (Ом)	z_{c2} (Ом)	z_{c3} (Ом)	P _н Вт	Cosφ	Род нагрузки
1	220	5+j4,2	4,2+j6	5	3+j6	-j15	15-j10	8-j20	-	8-j20	1000	0,85	емк.
2	220	7-j2,5	6-j3	-j2	10+j10	-	18-j10	17-j18	5-j4	-	6200	0,78	инд.
3	380	17-j17	10	14+j9,8	12-j48	10+j17	-	20+j14	-	15-j9	4500	0,95	инд.
4	380	21+j25	25+j10	-	13-j10	5	15+j7	18-j18	-	+j18	700	0,95	емк.
5	220	10-j5,8	5,5+j15	-	6+j5,4	-j4	10-j4	9+j8	2-j11	-	5700	0,87	инд.
6	220	12-j48	6-j24	4+j6	11	15+j26	-	11+j7	-	10-j19	2000	0,8	инд.
7	220	6+j5,5	-j15	10	12-j12	9+j18	10	8-j13	-	14+j16	1500	0,8	инд.
8	220	5,6-j8	7-j7	-	15+j5	-	17-j8	19+j12	-j20	19-j8	1100	0,7	емк.
9	380	4,2+j5	5	8+j7	9-j7	5+j6	-	10+j14	2-j2	12-j12	900	0,85	инд.
10	380	3+j6	5,6-j8	-	7,5-j30	-	17+j8	16+j10	4+j10	+j10	1400	0,65	инд.
11	220	14+j9,8	10+j10	-	16-j8	10+j5,8	21+j8	3-j20	-	-j15	5000	0,9	инд.
12	380	15-j6	6+j5,4	+j10	6-j4	-j11	-	11+j11	5	16+j18	800	0,8	емк.
13	220	17+j8	+j2	18-j8	5-j11	6+j3	-	23+j15	2	20-j20	3200	0,75	емк.
14	220	36+j18	40+j20	-	8+j16	-	25-j10	48-j24	+j30	10+j15	3000	0,85	инд.
15	380	23-j49	14+j30	-	20-j10	-	15-j15	25+j20	-j5	16-j6	1700	0,78	емк.
16	380	15	13+j3,5	10-j6	20-j13	7+j2,5	-	18+j4	-	15+j10	1300	0,9	емк.
17	220	20+j12	15-j6	-	19-j7,5	-	16+j35	10-j13	4	11-j11	1600	0,75	инд.
18	380	22+j26	-	8+j18	10-j5,8	6-j24	+j24	7-j12	8+j20	-	900	0,95	инд.
19	220	+j9	7,5-j30	-	5,5+j45	-j6,5	8,5+j11	13-j8	-	10-j8	1000	0,7	инд.
20	380	7-j10	9+j9	11-j11	+j10	13-j14	-	8+j6	-	12+j24	2200	0,8	емк.
21	380	11-j19	-	18+j5	10-j20	15-j6	-	17-j11	-j28	6+j13	1200	0,78	емк.
22	220	4+j2	11-j4	-	4,2+j5	-	7,5-j30	10-j9	8	20-j18	700	0,65	инд.
23	220	-j2	10+j5,8	6+j5,4	5-j8	18+j8	-	15+j7	-	17-j10	4000	0,87	инд.
24	380	25+j9	-j3	20-j9	14+j6	20-j12	-	5,6-j8	-	9-j9	3500	0,9	инд.
25	220	4+j3,6	5,8+j10	-	11-j9	+j8	14-j9,8	6-j5,5	-	12+j12	2000	0,7	емк.
26	220	8+j14,4	-	13-j14	10-j6,8	8+j1,5	15	12-j10	-	15+j20	1800	0,65	емк.
27	220	16+j35	21+j25	-	15-j20	10	16+j10	13+j20	-	5-j3	1500	0,8	инд.
28	380	27-j83	40+j20	-	19-j14	J14	19+j10	25+j20	6-j2	-	6500	0,95	емк.
29	380	30-j48	-	15+j24	25+j9	5-j19	+j19	15-j11	14+j26	-	850	0,78	инд.
30	220	8	11,7+j25	-	11-j5,8	7+j8	13-j3,5	14+j20	-	10-j5	800	0,85	емк.

4 Расчетно - графическая работа №4. Расчёт параметров и характеристик трёхфазного трансформатора

Задание по РГР №4.

По техническим данным трехфазного двухобмоточного трансформатора с соединением обмоток Y/Y-0 требуется определить:

- номинальные токи в обмотках трансформатора $I_{1НОМ}$, $I_{2НОМ}$;
- коэффициент мощности холостого хода $\cos\varphi_0$;
- коэффициент мощности короткого замыкания $\cos\varphi_K$;
- сопротивления первичной R_1, X_1 и вторичной R_2, X_2 обмоток;
- сопротивления намагничивающей цепи R_0, X_0 ;
- максимальный КПД трансформатора $\eta_{МАХ}$.

Построить:

- внешнюю характеристику трансформатора $U_2 = f(\beta)$;
- зависимость $\eta = f(\beta)$ при активно-индуктивной нагрузке и коэффициенте мощности $\cos\varphi_2 = 0,8$;

Технические характеристики трансформаторов приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1- Технические характеристики трансформаторов

№ вар	Тип трансформатора	Полная мощность, S, кВА	Верхний предел номинального напряжения обмотки, кВ		Потери, кВт		Ток хол. хода, i_0 , %	Напряжение КЗ на номинальной ступени, u_k , %
			$U_{1НОМ}$	$U_{2НОМ}$	P_0	P_k		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	ТМ - 25/6	25	6,3	0,23	0,170	0,6	5,15	4,5
2	ТМ - 40/6	40	6,3	0,4	0,240	0,880	4,5	4,5
3	ТМ - 63/6	63	6,3	0,4	0,360	1,28	4,5	4,5
4	ТМ -100/6	100	6,3	0,4	0,490	1,97	4,15	4,5
5	ТМ -160/6	160	6,3	0,23	0,73	2,65	3,85	4,5
6	ТМ -250/6	250	6,3	0,4	1,05	3,7	3,7	4,5
7	ТМ - 400/6	400	6,0	0,23	1,2	5,5	2,1	4,5
8	ТМВМ-25/6	25	6,3	0,23	0,105	0,6	0,6	4,5
9	ТМВМ-40/10	40	10,0	0,23	0,15	0,88	0,6	4,5
10	ТМВМ-63/6	63	6,3	0,23	0,22	1,28	0,55	4,5
11	ТМВМ-100/6	100	6,3	0,4	0,31	1,97	0,55	4,5

Окончание таблицы 4.1

12	ТМВМ-160/6	160	6,3	0,4	0,46	2,65	0,5	4,5
13	ТМВМ-250/6	250	6,3	0,23	0,66	3,7	0,5	4,5
14	ТМ - 25/6	25	6,3	0,4	0,170	0,6	5,15	4,5
15	ТМ- 25/10	25	10,0	0,23	0,170	0,6	5,15	4,5
16	ТМ - 40/10	40	10,0	0,4	0,240	0,880	4,5	4,5
17	ТМ - 63/10	63	10,0	0,4	0,360	1,28	2,8	4,5
18	ТМ-100/10	100	10,0	0,4	0,490	1,97	4,15	4,5
19	ТМ-160/10	160	10,0	0,23	0,73	2,65	3,85	4,5
20	ТМ-250/10	250	10,0	0,23	1,05	3,7	3,7	4,5
21	ТМ-400/10	400	10,0	0,23	1,2	5,5	2,1	4,5
22	ТМВМ-25/10	25	10,0	0,23	0,105	0,6	0,6	4,5
23	ТМ - 40/10	40	10,0	0,23	0,240	0,880	4,5	4,5
24	ТМВМ-100/10	100	10,0	0,4	0,31	1,97	0,55	4,5
25	ТМВМ-160/10	160	10,0	0,23	0,46	2,65	0,5	4,5
26	ТМВМ-250/10	250	10,0	0,23	0,66	3,7	0,5	4,5
27	ТМГ-100/10-Х1	100	10,0	0,23	0,29	1,97	2,0	4,5
28	ТМВГ-250/10-Х1	250	10,0	0,23	0,525	3,7	0,45	4,7
29	ТСМ-320/10	320	10,0	0,525	1,35	4,65	5,5	4,5
30	ТС3-169/10	160	6,0	0,23	0,7	2,7	5,5	4,0
31	ТМ - 63/10	63	10,0	0,23	0,360	1,28	2,8	4,5
32	ТС3- 400/10	400	6,0	0,23	1,3	5,4	5,5	3,0
33	ТС3С-630/10	630	6,3	0,4	2,0	8,5	8,0	2,0
34	ТМ -63/20	63	20,0	0,4	0,390	1,28	4,5	5,0
35	ТМ-100/20	100	20,0	0,4	0,625	1,97	4,15	6,5
36	ТМ-100/20	100	20,0	0,23	0,625	1,97	4,15	6,5

5 Пример выполнения РГР №1. Расчет линейных цепей постоянного тока

Задание по РГР №1.

Исходные данные в соответствии с вариантом № (№ зачетной книжки):
 $E_1=110$ В; $E_2= 160$ В; $R_1= 50$ Ом; $R_2= 80$ Ом; $R_3=30$ Ом.

Схема заданной цепи приведена на рисунке 1.1.

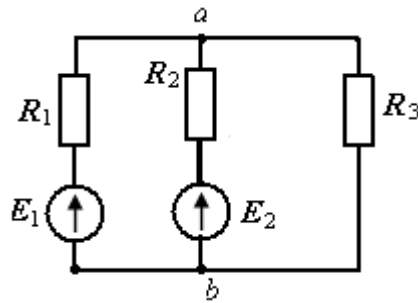


Рисунок 1.1

Составление системы уравнений в соответствии с первым и вторым законами Кирхгофа.

Если электрическая цепь содержит v ветвей, то в общем случае необходимо определить v токов, т.е. токи в каждой из ветвей. Следовательно, общее число уравнений по первому и второму законам Кирхгофа должно быть равно v . При числе узлов y число независимых уравнений по первому закону Кирхгофа будет $(y-1)$, следовательно, остальные n уравнений должны быть составлены по второму закону Кирхгофа: $n=v - (y-1)$.

В заданной схеме $y=2$, $v=3$. Следовательно, по первому закону Кирхгофа надо составить $(y-1)$, т.е. одно уравнение, а по второму - два уравнения: $n=v - (y-1)=2$.

Обозначим стрелками произвольно выбранные положительные направления токов I_1 , I_2 и I_3 в ветвях. Выберем два независимых контура и укажем стрелками произвольно выбранные направления их обхода (рисунок 1.2).

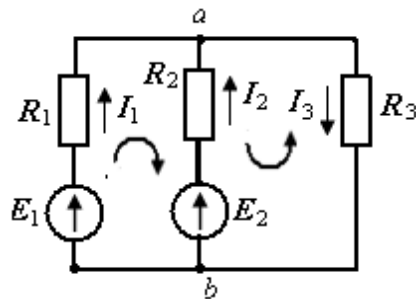


Рисунок 1.2

Составим одно уравнение по первому закону Кирхгофа для узла a и два уравнения по второму закону Кирхгофа для выбранных независимых контуров, учитывая при этом, что ЭДС и падения напряжений берутся со знаком «плюс», если направления ЭДС и токов совпадают с направлением обхода соответствующего контура:

$$\begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 = 0 \\ I_1 R_1 - I_2 R_2 = E_1 - E_2 \\ -I_3 R_3 - I_2 R_2 = -E_2 \end{cases}$$

В дальнейшем полученную систему уравнений решают относительно неизвестных токов. Если некоторые токи получаются отрицательными, то это означают, что их действительные направления противоположны выбранным направлениям.

Достоинство метода – общность, а недостаток – громоздкость (число уравнений равно числу ветвей).

Определение токов в ветвях цепи по методу контурных токов.

Метод контурных токов сводится к составлению и решению системы уравнений, получаемых только по второму закону Кирхгофа применительно к понятиям контурных токов, сопротивлений и ЭДС.

Считается, что в каждом независимом контуре протекает свой контурный ток, который создает падение напряжения на тех сопротивлениях цепи, по которым он протекает.

Достоинством метода контурных токов является сокращение числа составляемых уравнений на $(y-1)$, что значительно упрощает расчет. При этом, чем больше узлов в электрической цепи, тем целесообразнее применять данный метод.

Порядок расчета методом контурных токов:

1) Для каждого независимого контура произвольно выбирают положительное направление контурного тока (рисунок 1.3).

2) Для каждого контура составляют уравнение по второму закону Кирхгофа. При этом направление обхода контура выбирают совпадающими с направлением контурного тока.

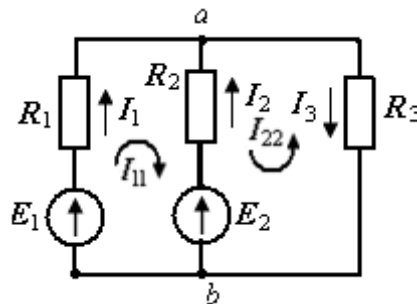


Рисунок 1.3

$$\begin{cases} (R_1+R_2)I_{11}+ R_2I_{22}=E_1-E_2 \\ R_2I_{11}+(R_2+R_3)I_{22}=-E_2 \end{cases}$$

где $(R_1+R_2)=R_{11}$ - собственное сопротивление первого контура;

$(R_2+R_3)= R_{22}$ - собственное сопротивление второго контура;

$R_2= R_{12}$ – взаимное сопротивление контуров;

$(E_1-E_2)= E_{11}$ – контурная ЭДС первого контура;

$-E_2= E_{22}$ – контурная ЭДС второго контура.

Перепишем эти уравнения с учетом исходных данных:

$$\begin{cases} (50+80)I_{11} + 80I_{22} = 110 - 160; \\ 80I_{11} + (80+30)I_{22} = -160, \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} 130I_{11} + 80I_{22} = -50; \\ 80I_{11} + 110I_{22} = -160. \end{cases}$$

3) Решаем систему уравнений относительно контурных токов с помощью определителей:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 130 & 80 \\ 80 & 110 \end{vmatrix} = 130 \cdot 110 - 80 \cdot 80 = 14300 - 6400 = 7900;$$

$$\Delta_{11} = \begin{vmatrix} -50 & 80 \\ -160 & 110 \end{vmatrix} = -5500 - (-160) \cdot 80 = 7300;$$

$$\Delta_{22} = \begin{vmatrix} 130 & -50 \\ 80 & -160 \end{vmatrix} = -20800 - (-50) \cdot 80 = -16800.$$

Определяем контурные токи:

$$I_{11} = \Delta_{11} / \Delta = 7300 / 7900 = 0,924 \text{ A};$$

$$I_{22} = \Delta_{22} / \Delta = -16800 / 7900 = -2,127 \text{ A}.$$

4) По контурным токам (I_{11} , I_{22}) определяем действительные токи (I_1 , I_2 и I_3) в ветвях. При этом:

а) ток в ветви, по которой контурный ток протекает индивидуально (т.е. один контурный ток), равен этому контурному току и совпадает с ним по направлению, если контурный ток в результате расчета получился положительным;

б) ток в ветви, которая является общей для двух контуров, определяется как алгебраическая сумма соответствующих контурных токов.

С учетом вышесказанного, получим:

$$I_1 = I_{11} = 0,924 \text{ A};$$

$$I_2 = -(I_{11} + I_{22}) = -0,924 - (-2,127) = 1,203 \text{ A};$$

$$I_3 = -I_{22} = -(-2,127) = 2,127 \text{ A}.$$

5) Проверяем правильность расчета по законам Кирхгофа.

По первому закону:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0;$$

$$0,924 + 1,203 - 2,127 = 0.$$

$$0 = 0$$

или

По второму закону:

$$а) I_1 R_1 - I_2 R_2 = E_1 - E_2,$$

или

$$0,924 \cdot 50 - 1,203 \cdot 80 = 110 - 160,$$

или

$$46,2 - 96,24 = -50, \\ -50,04 = -50.$$

$$\text{б) } -I_3 R_3 - I_2 R_2 = -E_2,$$

или

$$-2,127 \cdot 30 - 1,203 \cdot 80 = -160, \\ -63,81 - 96,24 = -160, \\ -160,05 = -160.$$

Проведенная проверка результатов по законам Кирхгофа показывает, что расчет выполнен правильно.

Определение токов в ветвях цепи по методу узловых потенциалов.

Сущность этого метода сводится к решению системы уравнений, составленных только по первому закону Кирхгофа. Из этих уравнений определяют напряжения в узлах схемы электрической цепи относительно некоторого базисного узла, потенциал которого изначально принимают равным нулю, а токи в ветвях, соединяющих узлы, находят по закону Ома.

Метод применяется в том случае, когда число узлов без единицы меньше числа независимых контуров. В этом случае метод является более эффективным, чем метод контурных токов.

Частным случаем разветвленной схемы является схема с двумя узлами. Метод узловых потенциалов, применяемый для расчета цепи с двумя узлами, называют *методом двух узлов*.

Рассмотрим заданную электрическую цепь с двумя узлами, схема которой представлена на рисунке 4.1.

Порядок расчета методом узловых потенциалов (*методом двух узлов*):

- 1) Выбираем произвольно положительные направления токов в ветвях.
- 2) Принимаем потенциал одного из узлов, например узла *b*, равным нулю ($\varphi_b = 0$).

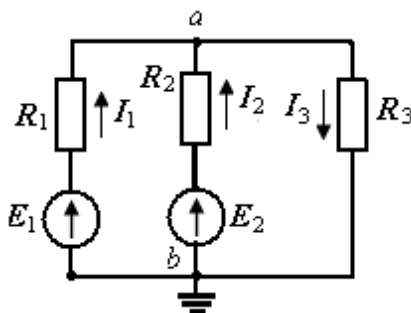


Рисунок 4.1

- 3) Составляем уравнение по первому закону Кирхгофа для узла *a*:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0.$$

Определяем выражения для токов в ветвях по закону Ома через

потенциалы, ЭДС и сопротивления ветвей:

$$\begin{aligned}I_1 &= (\varphi_b - \varphi_a + E_1) / R_1 = (-\varphi_a + E_1) \cdot g_1; \\I_2 &= (\varphi_b - \varphi_a + E_2) / R_2 = (-\varphi_a + E_2) \cdot g_2; \\I_3 &= -(\varphi_b - \varphi_a) / R_3 = \varphi_a \cdot g_3,\end{aligned}$$

где φ_a - потенциал узла a ;

$g_1 = 1/R_1$, $g_2 = 1/R_2$, $g_3 = 1/R_3$ – проводимости ветвей цепи.

Подставляем полученные выражения в уравнение, составленное по первому закону Кирхгофа:

$$(-\varphi_a + E_1) \cdot g_1 + (-\varphi_a + E_2) \cdot g_2 - \varphi_a \cdot g_3 = 0,$$

или

$$\varphi_a (g_1 + g_2 + g_3) = E_1 \cdot g_1 + E_2 \cdot g_2.$$

4) Последнее уравнение решаем относительно потенциала φ_a :

$$\varphi_a = (E_1 \cdot g_1 + E_2 \cdot g_2) / (g_1 + g_2 + g_3).$$

Перепишем это уравнение с учетом исходных данных:

$$\varphi_a = (110 \cdot 1/50 + 160 \cdot 1/80) / (1/50 + 1/80 + 1/30) = 63,83 \text{ В.}$$

5) Находим токи в ветвях:

$$\begin{aligned}I_1 &= (-\varphi_a + E_1) \cdot g_1 = (-63,83 + 110) \cdot 1/50 = 0,9234 \text{ А}; \\I_2 &= (-\varphi_a + E_2) \cdot g_2 = (-63,83 + 160) \cdot 1/80 = 1,202 \text{ А}; \\I_3 &= \varphi_a \cdot g_3 = 63,83/30 = 2,128 \text{ А}.\end{aligned}$$

6) Проверяем правильность решения по первому закону Кирхгофа:

$$\begin{aligned}I_1 + I_2 - I_3 &= 0; \\0,9234 + 1,202 - 2,128 &= -0,0026 \approx 0.\end{aligned}$$

Проведенная проверка результатов по первому закону Кирхгофа показывает, что расчет выполнен правильно.

Составление баланса мощностей для заданной цепи.

Из закона сохранения энергии следует, что алгебраическая сумма мощностей ($\sum_{i=1}^m P_{i.\text{ист}}$) всех источников энергии в любой момент времени равна сумме мощностей ($\sum_{k=1}^n P_{k.\text{пр}}$) всех приемников в цепи:

$$\sum_{i=1}^m P_{i.\text{ист}} = \sum_{k=1}^n P_{k.\text{пр}} ,$$

или

$$\sum_{i=1}^m E_{i.\text{ист}} I_{i.\text{ист}} = \sum_{k=1}^n I_{k.\text{пр}}^2 R_{k.\text{пр}} .$$

Мощность $E_{\text{ист}} I_{\text{ист}} > 0$, если источник работает в режиме генератора, т.е. когда $E_{\text{ист}}$ и $I_{\text{ист}}$ совпадают по направлению. Мощность $E_{\text{ист}} I_{\text{ист}} < 0$, если источник работает в качестве потребителя, т.е. когда $E_{\text{ист}}$ и $I_{\text{ист}}$ не совпадают по направлению.

Для заданной цепи уравнение энергетического баланса имеет вид:

$$E_1 I_1 + E_2 I_2 = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 ,$$

или

$$110 \cdot 0,9234 + 160 \cdot 1,202 = 0,9234^2 \cdot 50 + 1,202^2 \cdot 80 + 2,128^2 \cdot 30 .$$

После вычислений получим:

$$293,894 \text{ Вт} = 294,069 \text{ Вт} .$$

Следовательно, баланс мощностей соблюдается, при этом погрешность составляет ничтожную величину:

$$[(294,069 - 293,894) / 294,069] \cdot 100\% = 0,06\% .$$

Построение потенциальной диаграммы для контура цепи, содержащего два источника ЭДС.

График изменения потенциала вдоль какого-либо участка цепи или замкнутого контура называют *потенциальной диаграммой*.

Построим потенциальную диаграмму для контура *bdafb*, содержащего два источника ЭДС (рисунок 1.5).

Последовательность построения диаграммы:

1) Определение токов в ветвях. Токи в ветвях, входящих в данный контур были определены выше: $I_1 = 0,9234 \text{ А}$; $I_2 = 1,202 \text{ А}$.

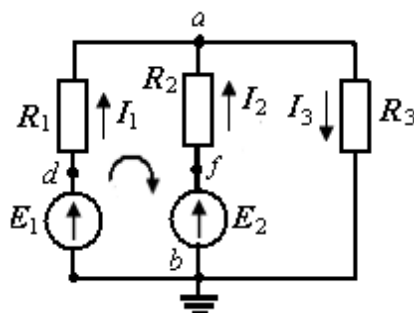


Рисунок 5.1

2) Принимаем потенциал точки *b* равным нулю (заземляем) $\phi_b = 0$.

3) Определяем потенциалы других точек (произвольно выбираем обход контура *bdafb*). При этом:

а) потенциал точки увеличивается на значение падения напряжения, если направление тока на участке противоположно обходу;

б) потенциал точки увеличивается на значение ЭДС, если ее направление совпадает с обходом.

$$\varphi_d = \varphi_b + E_1 = E_1 = 110 \text{ В};$$

$$\varphi_a = \varphi_d - I_1 R_1 = 110 - 0,9234 \cdot 50 = 63,83 \text{ В};$$

$$\varphi_f = \varphi_a + I_2 R_2 = 63,83 + 1,202 \cdot 80 = 159,99 \text{ В} \approx 160 \text{ В};$$

$$\varphi_b = \varphi_f - E_2 = 160 - 160 = 0 \text{ В};$$

в) отложим по оси абсцисс сопротивления (по масштабу) всех резисторов контура $bdafb$, двигаясь от точки b , потенциал которой принят равным нулю (рисунок 1.6). Эту точку на диаграмме поместим в начале координат. Координаты каждой точки определяются в соответствии со значением ее потенциала и сопротивлением резистора. Диаграмма строится на миллиметровке по масштабу.

На рисунке 1.6 показана потенциальная диаграмма для контура $bdafb$. По данной диаграмме можно определить напряжение между любыми двумя точками цепи. Например, напряжение между точками a и b , d и f :

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = 63,83 - 0 = 63,83 \text{ В};$$

$$U_{df} = \varphi_d - \varphi_f = 110 - 160 = -50 \text{ В}.$$

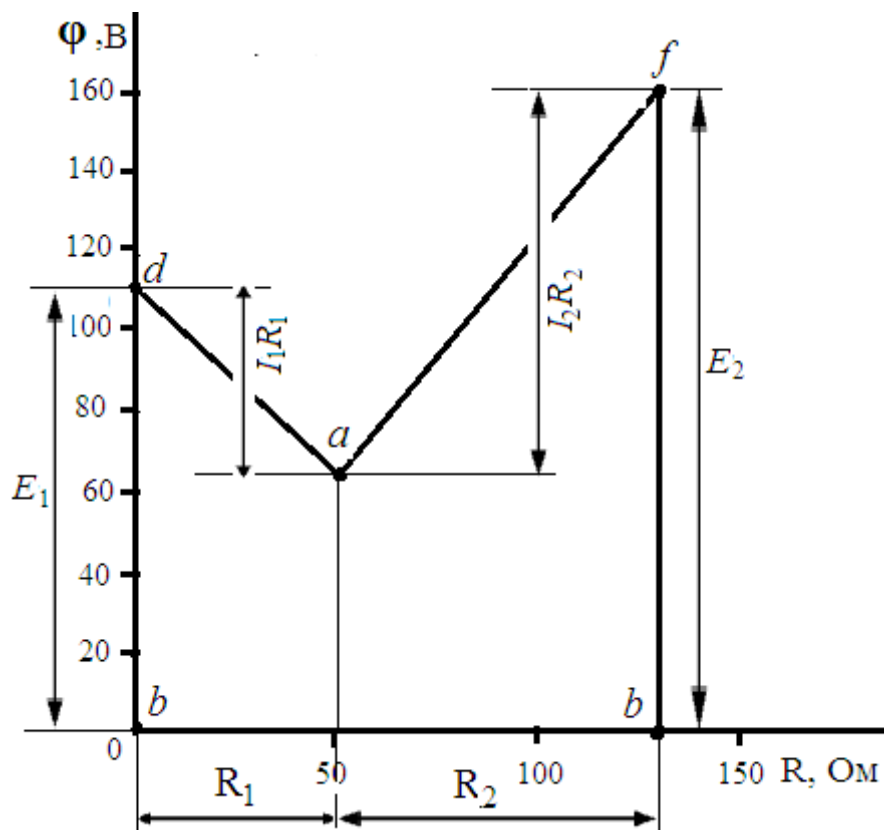


Рисунок 1.6 – Потенциальная диаграмма для контура $bdafb$

6 Пример выполнения РГР №2. Расчет линейной электрической цепи однофазного синусоидального тока со смешанным соединением приемников

Задание по РГР №2.

В электрической цепи со смешанным соединением приемников (рисунок 2.1) действует источник синусоидального напряжения $u = U_m \sin 2\pi ft$. Действующее значение напряжения U , частота f и параметры цепи приведены в таблице 2.1 (указать номер зачетной книжки).

Выполнить следующее:

а) рассчитать индуктивные X_L и емкостные X_C сопротивления, комплексные сопротивления каждой ветви и эквивалентное комплексное сопротивление всей цепи;

б) рассчитать комплексные действующие значения токов во всех ветвях и напряжений на элементах цепи, записать выражения для их мгновенных значений, проверить достоверность расчета по законам Кирхгофа;

в) составить баланс мощностей;

г) построить векторную диаграмму токов и напряжений.

Дано: схема электрической цепи однофазного синусоидального тока со смешанным соединением приемников (рисунок 2.1) и ее параметры (таблица 2.1).

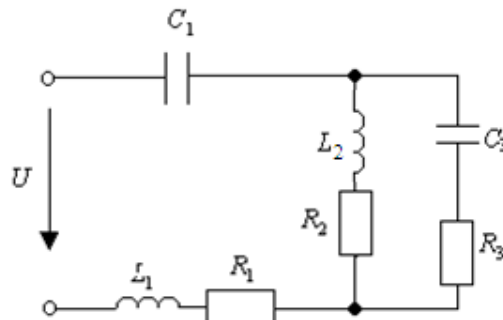


Рисунок 2.1

Таблица 2.1 – Параметры электрической цепи однофазного синусоидального тока

U, В	f, Гц	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R ₃ , Ом	L ₁ , мГн	L ₂ , мГн	C ₁ , мкФ	C ₃ , мкФ
85	600	40	130	100	35	40	3	1,5

Расчет комплексных сопротивлений ветвей и эквивалентного комплексного сопротивления всей цепи.

Определяем реактивные сопротивления всех элементов цепи:

$$x_{L1} = 2\pi f L_1 = 2 \cdot 3,14 \cdot 600 \cdot 35 \cdot 10^{-3} = 131,88 \text{ Ом};$$

$$x_{L2} = 2\pi f L_2 = 2 \cdot 3,14 \cdot 600 \cdot 40 \cdot 10^{-3} = 150,72 \text{ Ом};$$

$$x_{C1} = 1/2\pi f C_1 = 1/2 \cdot 3,14 \cdot 600 \cdot 3 \cdot 10^{-6} = 88,46 \text{ Ом};$$

$$x_{C3} = 1/2\pi f C_3 = 1/2 \cdot 3,14 \cdot 600 \cdot 1,5 \cdot 10^{-6} = 176,93 \text{ Ом}.$$

Определяем комплексные сопротивления ветвей цепи:

а) комплексное сопротивление \underline{Z}_1 неразветвленной части цепи:

$$\underline{Z}_1 = R_1 + j(x_{L1} - x_{C1}) = 40 + j(131,88 - 88,46) = 40 + j43,42 = 59,04e^{47,35^\circ};$$

б) комплексные сопротивления ($\underline{Z}_2, \underline{Z}_3$) параллельных ветвей (рисунок 2.2):

$$\underline{Z}_2 = R_2 + jx_{L2} = 130 + j150,72 = 199,04e^{j49,22^\circ};$$

$$\underline{Z}_3 = R_3 - jx_{C3} = 100 - j176,93 = 203,23e^{-j60,53^\circ}.$$

Определяем эквивалентное сопротивление всей цепи (рисунок 2.2):

$$\underline{Z}_{\text{ЭКВ}} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3};$$

$$\underline{Z}_{\text{ЭКВ}} = 40 + j43,42 + \frac{199,04e^{j49,22^\circ} \cdot 203,23e^{-j60,53^\circ}}{130 + j150,72 + 100 - j176,93} =$$

$$= 40 + j43,42 + \frac{40450,9e^{-j11,31^\circ}}{231,49 - j6,5^\circ} = 40 + j43,42 + 174,74e^{-j4,81^\circ} =$$

$$= 214,13 + j28,77 = 216,05e^{j7,65^\circ}$$

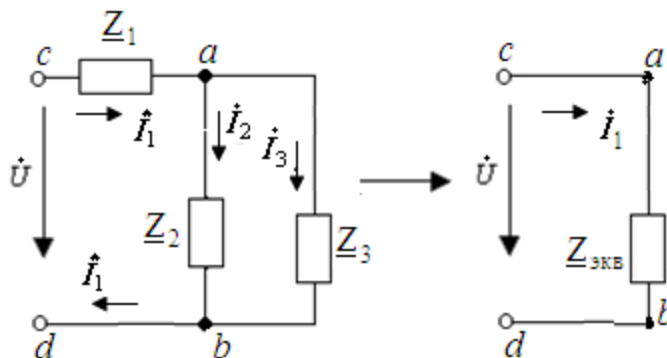


Рисунок 2.2

Определение токов в ветвях цепи и напряжений на элементах. Проверка достоверности расчета по законам Кирхгофа.

Ток в неразветвленной части определяем по закону Ома:

$$i_1 = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_{\text{ЭКВ}}} = \frac{85e^{j0^\circ}}{216,05e^{j7,65^\circ}} = 0,393e^{-j7,65^\circ} = 0,3895 - j0,0523 \text{ A.}$$

Токи в параллельных ветвях:

$$i_2 = i_1 \frac{\underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = 0,393e^{-j7,65^\circ} \cdot \frac{203,23e^{-j60,53^\circ}}{130 + j150,72 + 100 - j176,93} =$$

$$= \frac{79,96e^{-j68,18^\circ}}{231,49 - j6,5^\circ} = 0,3454e^{-j61,68^\circ} \text{ A} = 0,1639 - j0,3041 \text{ A};$$

$$i_3 = i_1 \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = 0,393e^{-j7,65^\circ} \cdot \frac{199,04e^{j49,22^\circ}}{130 + j150,72 + 100 - j176,93} =$$

$$= \frac{78,22e^{j41,57^\circ}}{231,49 - j6,5^\circ} = 0,3379e^{j48,07^\circ} \text{ A} = 0,2258 + j0,2514 \text{ A.}$$

Выражения для мгновенных значений токов:

$$i_1 = 0,393 \cdot \sqrt{2} \sin(3768t - 7,65^\circ);$$

$$i_2 = 0,3454 \cdot \sqrt{2} \sin(3768t - 61,68^\circ);$$

$$i_3 = 0,3379 \cdot \sqrt{2} \sin(3768t + 48,07^\circ).$$

Определяем комплексы действующих значений напряжений на всех элементах цепи:

$$\dot{U}_{R1} = \dot{I}_1 \cdot R_1 = 0,393e^{-j7,65^\circ} \cdot 40 = 15,72e^{-j7,65^\circ} \text{ В} = 15,58 - j2,0927 \text{ В};$$

$$\dot{U}_{R2} = \dot{I}_2 \cdot R_2 = 0,3454e^{-j61,68^\circ} \cdot 130 = 44,90e^{-j61,68^\circ} \text{ В} = 21,3004 - j39,528 \text{ В};$$

$$\dot{U}_{R3} = \dot{I}_3 \cdot R_3 = 0,3379e^{j48,07^\circ} \cdot 100 = 33,79e^{j48,07^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{C1} = \dot{I}_1 \cdot (-jx_{C1}) = 0,393e^{-j7,65^\circ} \cdot 88,46e^{-j90^\circ} = 34,765e^{-j97,65^\circ} \text{ В}$$

$$= -4,628 - j34,4556 \text{ В};$$

$$\dot{U}_{C3} = \dot{I}_3 \cdot (-jx_{C3}) = 0,3379e^{j48,07^\circ} \cdot 176,93e^{-j90^\circ} = 59,785e^{-j41,93^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{L1} = \dot{I}_1 \cdot (jx_{L1}) = 0,393e^{-j7,65^\circ} \cdot 131,88e^{j90^\circ} = 51,829e^{82,35^\circ} \text{ В} =$$

$$= 6,8995 + j51,3677 \text{ В};$$

$$\dot{U}_{L2} = \dot{I}_2 \cdot (jx_{L2}) = 0,3454e^{-j61,68^\circ} \cdot 150,72e^{j90^\circ} = 52,059e^{j28,32^\circ} \text{ В} =$$

$$= 45,8281 + j24,6965 \text{ В.}$$

Напряжение \dot{U}_{ab} между узлами a и b :

$$\dot{U}_{ab} = \dot{I}_1 \cdot \underline{Z}_{ab} = \dot{I}_1 \cdot \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = 0,393e^{-j7,65^\circ} \cdot 174,74^{-j4,81^\circ} = 68,673e^{-j12,46^\circ} \text{ В.}$$

Проверяем достоверность расчета по законам Кирхгофа:

а) по первому закону:

$$\dot{I}_1 - (\dot{I}_2 + \dot{I}_3) = 0;$$

$$\begin{aligned} 0,3895 - j0,0523 - (0,1639 - j0,3041 + 0,2258 + j0,2514) = \\ = 0,0002 + j0,0004 \approx 0; \end{aligned}$$

б) по второму закону Кирхгофа:

$$\begin{aligned} \dot{U} - \dot{U}_{C1} - \dot{U}_{L2} - \dot{U}_{R2} - \dot{U}_{R1} - \dot{U}_{L1} &= 0; \\ \dot{U} - (\dot{U}_{C1} + \dot{U}_{L2} + \dot{U}_{R2} + \dot{U}_{R1} + \dot{U}_{L1}) &= 0; \\ 85 - (-4,628 - j34,4556 + 45,8281 + j24,6965 + 21,3004 - j39,528 + \\ + 15,58 - j2,0927 + 6,8995 + j51,3677) &= 85 - (84,98 - 0,0091) \approx 0. \end{aligned}$$

Результаты проверки показывают, что расчет выполнен правильно.

Составление баланса мощностей.

Если в цепи синусоидального тока несколько (m) источников и несколько (n) потребителей (нагрузка), то:

$$\sum_{i=1}^m \tilde{S}_{i.ист} = \sum_{k=1}^n \tilde{S}_{k.пот}$$

или

$$\sum_{i=1}^m (P_{i.ист} + jQ_{i.ист}) = \sum_{k=1}^n (P_{k.пот} + jQ_{k.пот}).$$

Это равенство справедливо при условии, что равны друг другу суммы вещественных и мнимых частей комплексных мощностей источников и потребителей, т.е.:

$$\sum_{i=1}^m P_{i.ист} = \sum_{k=1}^n P_{k.пот} \quad \text{и} \quad \sum_{i=1}^m Q_{i.ист} = \sum_{l=1}^l Q_{l.пот}.$$

В цепи синусоидального тока с несколькими источниками энергии и несколькими потребителями баланс мощностей выполняется при условии, что порознь равны друг другу активные суммарные и реактивные мощности всех

источников и всех потребителей, т.е. при условии, что: 1) $\sum P_{ист} = \sum P_{пот}$; 2) $\sum Q_{ист} = \sum Q_{пот}$.

Составляем баланс мощностей для заданной электрической цепи.

$$\begin{aligned}\tilde{S}_{уст} &= P_{уст} + jQ_{уст} = U \cdot \check{I}_1 = 85 \cdot 0,393e^{j7,65^\circ} = 33,405e^{j7,65^\circ} = \\ &= 33,108 + j4,447.\end{aligned}$$

Здесь \check{I}_1 - сопряженный комплекс тока I_1 , $\check{I}_1 = 0,393e^{j7,65^\circ}$.

Активная и реактивная мощности, отдаваемые источником:

$$P_{уст} = 33,108 \text{ Вт}; Q_{уст} = 4,447 \text{ ВАр}.$$

Активные мощности, потребляемые активными элементами цепи:

$$\begin{aligned}\sum_{k=1}^3 P_{k.nom} &= P_{R1} + P_{R2} + P_{R3} = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 + I_3^2 \cdot R_3; \\ \sum_{k=1}^3 P_{k.nom} &= 0,393^2 \cdot 40 + 0,3454^2 \cdot 130 + 0,3379^2 \cdot 100 = 33,105 \text{ Вт}.\end{aligned}$$

Реактивные мощности, потребляемые реактивными элементами цепи:

$$\begin{aligned}\sum_{l=1}^4 Q_{l.nom} &= Q_{L1} + Q_{L2} - Q_{C1} - Q_{C3} = I_1^2 \cdot x_{L1} + I_2^2 \cdot x_{L2} - I_1^2 \cdot x_{C1} - I_3^2 \cdot x_{C3}; \\ \sum_{l=1}^4 Q_{l.nom} &= 0,393^2 \cdot 131,88 + 0,3454^2 \cdot 150,72 - 0,393^2 \cdot 88,76 - \\ &- 0,3379^2 \cdot 176,93 = 4,44 \text{ ВАр}.\end{aligned}$$

Результаты расчета показывают, что баланс мощностей выполняется:

$$P_{уст} = \sum_{k=1}^3 P_{k.nom}; Q_{уст} = \sum_{l=1}^4 Q_{l.nom}.$$

Построение векторной диаграммы токов и напряжений для заданной цепи.

Аналитические расчеты электрических цепей синусоидального тока рекомендуется сопровождать построением векторных диаграмм. Они дают возможность качественно контролировать аналитические расчеты.

Для построения векторной диаграммы запишем уравнения по законам Кирхгофа для векторов действующих значений напряжений и токов:

$$\begin{aligned}\bar{I}_1 &= \bar{I}_2 + \bar{I}_3; \\ \bar{U} &= \bar{U}_{C1} + \bar{U}_{R1} + \bar{U}_{L1} + \bar{U}_{ab}; \\ \bar{U}_{ab} &= \bar{U}_{L2} + \bar{U}_{R2}; \bar{U}_{ab} = \bar{U}_{C3} + \bar{U}_{R3}.\end{aligned}$$

Действующие значения токов и напряжений:

$I_1=0,393$ А, $I_2=0,3454$ А, $I_3=0,3379$ А, $U_{R1}=15,72$ В, $U_{R2}=44,9$ В, $U_{R3}=33,79$ В, $U_{C1}=34,765$ В, $U_{C3}=59,785$ В, $U_{L1}=51,829$ В, $U_{L2}=52,059$ В.

Выберем масштаб для токов $m_i=0,1$ А/см и масштаб для напряжений $m_U=10$ В/см.

Ток \bar{I}_2 направим из точки O по произвольно выбранной оси (рисунок 2.3). Падение напряжения U_{R2} по фазе совпадает с током I_2 . Падение напряжения U_{L2} в индуктивном сопротивлении опережает ток I_2 на 90° . Вектор \bar{U}_{ab} является результатом геометрического сложения двух векторов: $\bar{U}_{L2} + \bar{U}_{R2} = \bar{U}_{ab}$. Этот вектор также является результатом геометрического сложения двух других векторов: $\bar{U}_{ab} = \bar{U}_{C3} + \bar{U}_{R3}$ (рисунок 3). Модули векторов $\bar{U}_{C3}, \bar{U}_{R3}$ известны, но неизвестны их положения на векторной диаграмме.

Из начала вектора \bar{U}_{ab} проводим дугу радиусом, равным U_{R3} , а из его конца - дугу радиусом, равным U_{C3} (рисунок 2.3). Точка пересечения этих дуг дает третью вершину треугольника напряжений U_{R3}, U_{C3}, U_{ab} , т.е. точку O' , в которой один вектор (\bar{U}_{R3}) оканчивается, а другой (\bar{U}_{C3}) вектор начинается. После того, как на диаграмме определены положения векторов $\bar{U}_{C3}, \bar{U}_{R3}$, можно изобразить на ней вектора \bar{I}_3 по масштабу. Направление вектора \bar{I}_3 совпадает с направлением вектора \bar{U}_{R3} (рисунок 2.3).

Складывая векторы \bar{I}_3 и \bar{I}_2 геометрически, находим вектор тока \bar{I}_1 . Направление вектора падения напряжения U_{R1} совпадает с направлением вектора \bar{I}_1 , вектор \bar{U}_{L1} опережает вектор \bar{I}_1 на 90° . Из конца \bar{U}_{L1} проводим вектор \bar{U}_{C1} в противоположном направлении, так как он отстает от \bar{I}_1 на 90° . Вектор, соединяющий точку O с концом вектора \bar{U}_{C1} , является вектором \bar{U} приложенного напряжения (рисунок 2.3).

Проведем ось по направлению, совпадающему с вектором \bar{U} приложенного напряжения (его начальная фаза $\varphi_U = 0$), и относительно этой оси найдем начальные фазы (углы) векторов других величин, используя для этого транспортир (рисунок 2.3). Измерив длину каждого вектора линейкой и умножив полученные данные на соответствующий масштаб, находим значения длин векторов. Найденные графическим путем значения длин и начальных фаз векторов сравниваем с их расчетными значениями.

Анализ показывает, что изображенные на диаграмме векторы токов и напряжений имеют длину и начальные фазы, совпадающими с расчетными значениями.

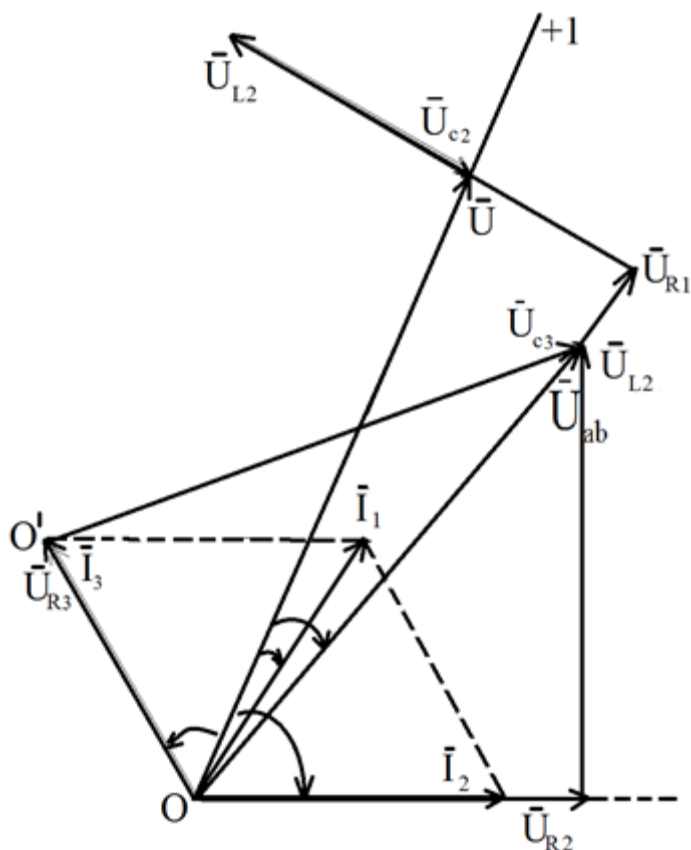


Рисунок 2.3 – Векторная диаграмма токов и напряжений

7 Пример выполнения РГР №3. Расчет трехфазной цепи синусоидального тока

Задание по РГР №3.

Параметры цепи заданы в таблице 3.2

Таблица 3.2

$U_{л}$	Z_{a1}	Z_{a2}	Z_{a3}	Z_{b1}	Z_{b2}	Z_{b3}	Z_{c1}	Z_{c2}	Z_{c3}	P_H	$\cos \varphi$	Род нагрузки
В	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Вт		
380 В	$10 + j9,8$	-	$10 + j10$	$10 - j8$	$10 + j5,8$	12	$21 + j8$	$-j15$	-	7000	0,85	Индуктивная

Примечание - Прочерк в задании означает отсутствие комплексного сопротивления, т.е. величина этого сопротивления равна бесконечности (разрыв в цепи). Изобразим схему в соответствии с условием задания.

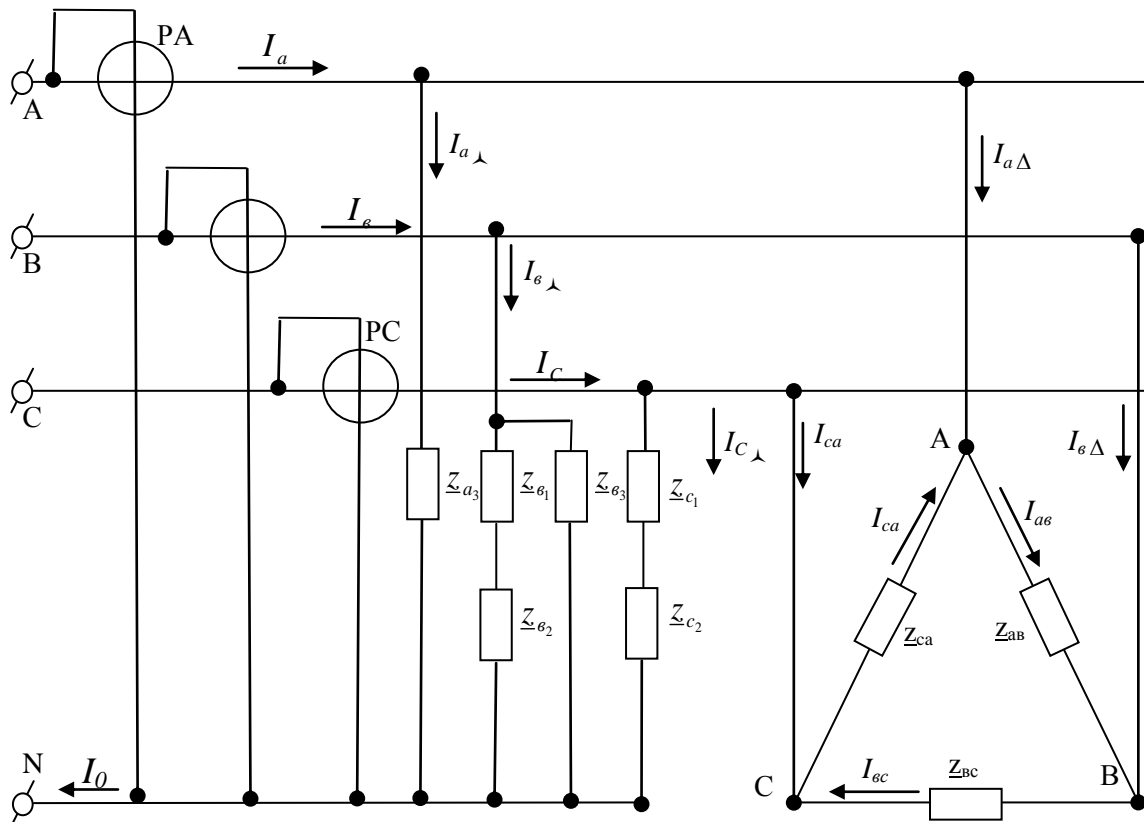


Рисунок 3.1 - Заданная трехфазная цепь

Отсутствие резистивных элементов z_{a1} и z_{a2} на схеме (рисунок 3.1) объясняется отсутствием значения резистивного элемента z_{a2} (прочерк в таблице).

Определение фазных и линейных напряжений в трёхфазной сети.

Для определения соотношений между фазными и линейными напряжениями трёхфазной сети учтём, что трёхфазная цепь при соединении «звезда» имеет нейтральный провод, сопротивление которого пренебрежительно мало, поэтому:

$$U_{\phi} = \frac{U_{\lambda}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220B.$$

Полагаем, что для фазы А начальная фаза $\Psi_A = 0$, тогда напряжение в комплексной форме:

$$\dot{U}_A = 220B.$$

Для фазы В:

$$\dot{U}_B = U_A(\cos 120^\circ - j\sin 120^\circ) = 220(-0,5 - j0,866) = (-110 - j190,5)B.$$

Для С:

$$\dot{U}_C = U_A(\cos 240^\circ - j\sin 240^\circ) = 220(-0,5 + j0,866) = (-110 + j190,5)B.$$

Связь между линейными и фазными напряжениями легко найти, воспользовавшись вторым законом Кирхгофа, согласно которому для контура ANBA рисунок 3.2 имеем:

$$\dot{U}_A - \dot{U}_B - \dot{U}_{AB} = 0$$

откуда:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B,$$

где \dot{U}_{ab} - линейное (между началами фаз А и В) напряжение. Аналогично могут быть получены выражения и для других линейных напряжений.

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C;$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A; \quad (3.1)$$

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_a - \dot{U}_b = 220 - (-110 - j190,5) = (330 + j190,5)\text{В};$$

$$\dot{U}_{bc} = \dot{U}_b - \dot{U}_c = (-110 - j190,5) - (-110 + j190,5) = -j381\text{В};$$

$$\dot{U}_{ca} = \dot{U}_c - \dot{U}_a = (-110 - j190,5) - 220 = (-330 + j190,5)\text{В}.$$

Определение фазных токов в однофазных приёмниках, соединённых по схеме «звезда»:

1) Найдём комплексные сопротивления фаз приёмников:

$$\underline{z}_a = \underline{z}_{a3} = (10 + j10) \text{ Ом};$$

$$\underline{z}_e = \frac{\underline{z}_{e12} \cdot \underline{z}_{e3}}{\underline{z}_{e12} + \underline{z}_{e3}},$$

где

$$\underline{z}_{e12} = \underline{z}_{e1} + \underline{z}_{e2} = 16 - j8 + 10 + j5,8 = (26 - j2,2), \text{ Ом};$$

\underline{z}_{e12} - комплексное сопротивление ветви в фазе В, содержащей приёмники \underline{z}_{e1} и \underline{z}_{e2} ;

$$\underline{z}_e = \frac{(26 - j2,2)12}{26 - j2,2 + 12} = (8,22 - j0,219) \text{ Ом};$$

$$\underline{z}_c = \underline{z}_{c1} + \underline{z}_{c2} = 21 + j8 - j15 = (21 - j7) \text{ Ом}.$$

2) Определяем фазные токи:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{\underline{z}_a} = \frac{220}{10 + j10} = (11 - j11) \text{ А};$$

$$\dot{I}_{B\alpha} = \frac{\dot{U}_B}{\underline{z}_e} = \frac{-110 - j190,5}{8,22 - j0,219} = (-12,75 - j23,52) \text{ А};$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{\underline{z}_c} = \frac{-110 + j190,5}{21 - j7} = (-7,44 + j6,59) \text{ А}.$$

3) Токи в однофазных приёмниках при соединении «звезда»:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{a3} = \dot{I}_{a\lambda} &= (11 - j11) \text{ A}; \\ \dot{I}_{a\lambda}^{12} &= \frac{\dot{U}_e}{z_{e12}} = \frac{-110 - j190,5}{26 - j2,2} = (-3,58 - j7,63) \text{ A}; \\ \dot{I}_{e1} = \dot{I}_{e2} = \dot{I}_{e\lambda}^{12} &= (3,58 - j7,63) \text{ A}; \\ \dot{I}_{e3} &= \frac{\dot{U}_e}{z_{e3}} = \frac{-110 - j190,5}{12} = (9,17 - j15,9) \text{ A}; \\ \dot{I}_{C1} = \dot{I}_{C2} = \dot{I}_C &= (-7,44 + j6,59) \text{ A}. \end{aligned}$$

Определение фазных и линейных токов приемников, соединенных по схеме «треугольник»:

1) Находим фазные сопротивления приемников, соединенных по схеме «треугольник». При этом следует учесть, что при соединении «треугольник» справедливо соотношение $U_{л} = U_{\phi}$.

Так как при симметричной нагрузке:

$$P_H = 3U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos \varphi,$$

а

$$I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{z_{\phi}},$$

где z_{ϕ} – модуль комплексного сопротивления фазы.

Тогда

$$P_H = 3 \frac{U_{\phi}^2}{z_{\phi}} \cdot \cos \varphi$$

откуда

$$z_{\phi} = \frac{3U_{\phi}^2 \cdot \cos \varphi}{P_H} = \frac{3 \cdot 380^2 \cdot 0,85}{7000} = 52,6 (\text{Ом}).$$

Комплексные сопротивления приемников каждой фазы:

$$z_{ae} = z_{ec} = z_{ca} = z_{\phi} (\cos \varphi + j \sin \varphi) = (44,7 + j27,7) \text{ Ом}$$

Величина $\sin \varphi$ определяется по заданному значению $\cos \varphi$.

2) Определяем фазные токи при соединении потребителей «треугольником».

$$\begin{aligned} \dot{I}_{ae\Delta} &= \frac{\dot{U}_{ae}}{z_{ae}} = \frac{330 + j190,5}{44,7 + j27,7} = (7,24 - j0,23) \text{ A}; \\ \dot{I}_{ec\Delta} &= \frac{\dot{U}_{ec}}{z_{ec}} = \frac{-j381}{44,7 + j27,7} = (-3,82 - j6,16) \text{ A}; \\ \dot{I}_{ca\Delta} &= \frac{\dot{U}_{ca}}{z_{ca}} = \frac{-330 + j190,5}{44,7 + j27,7} = (-3,42 - j6,38) \text{ A}. \end{aligned} \quad (1)$$

3) Определяем линейные токи при соединении «треугольник».

$$\begin{aligned} \dot{I}_{a\Delta} &= \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} = (7,24 - j0,23) - (3,42 + j6,38) = (10,66 - j6,61) \text{ A}; \\ \dot{I}_{b\Delta} &= \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} = (-3,82 - j6,16) - (7,24 + j0,23) = (-11,06 - j5,93) \text{ A}; \\ \dot{I}_{c\Delta} &= \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} = (-3,42 + j6,38) - (-3,82 + j6,16) = (0,4 - j12,54) \text{ A}. \end{aligned} \quad (2)$$

Определение показателей ваттметров и активной мощности трёхфазной сети:

1) Полная комплексная мощность в каждой фазе от потребителей, соединённых по схеме «звезда» определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} \tilde{S}_a &= \dot{U}_a \dot{I}_a = 220(11 + j11) = (2420 + j2420) \text{ ВА}; \\ \tilde{S}_b &= \dot{U}_b \dot{I}_b = (-110 - j190,5)(-12,75 + 23,52) = (5883 - j158,3) \text{ ВА}; \\ \tilde{S}_c &= \dot{U}_c \dot{I}_c = (-110 + j190,5)(-7,44 - j6,59) = (2074 - j692,4) \text{ ВА}. \end{aligned}$$

где $\dot{I}_{a\Delta}, \dot{I}_{b\Delta}, \dot{I}_{c\Delta}$ - сопряженный расчётному комплексный ток соответствующей фазы.

Активная мощность в каждой фазе при соединении потребителя «звездой» определяется вещественной частью выражения для полной комплексной мощности:

$$P_{a\Delta} = 2420 \text{ Вт}; \quad P_{b\Delta} = 5883 \text{ Вт}; \quad P_{c\Delta} = 2074 \text{ Вт}.$$

2) Активная мощность потребителей, соединённых по схеме «треугольник», приходящаяся на одну фазу ввиду симметричности нагрузки

$$P_{\phi\Delta} = \frac{P_H}{3} = \frac{7000}{3} = 2333 \text{ Вт}.$$

3) Показания ваттметров определится как сумма активных мощностей в фазах от потребителей, соединённых в «звезду» и потребителей, соединённых в «треугольник»

$$\begin{aligned} P_a &= P_{a\Delta} + P_{a\phi} = 2420 + 2333 = 4753 \text{ Вт}; \\ P_b &= P_{b\Delta} + P_{b\phi} = 5883 + 2333 = 8216 \text{ Вт}; \\ P_c &= P_{c\Delta} + P_{c\phi} = 2074 + 2333 = 4407 \text{ Вт}. \end{aligned}$$

4) Активная мощность P трёхфазной сети:

$$\begin{aligned} P &= P_a + P_b + P_c = P_{a\Delta} + P_{b\Delta} + P_{c\Delta} + \\ &= 4753 + 8216 + 4407 = 2420 + 5883 + 2074 + 7000 = 17377 \text{ Вт}. \end{aligned}$$

Построение векторных диаграмм напряжений и токов, определение

токов в линейных проводах и тока в нейтральном проводе.

Векторные диаграммы строим в комплексной плоскости. Вещественную ось направляем вертикально, мнимую – горизонтально. Положительную полуось мнимой оси направляем влево, что будет соответствовать вращению векторов против часовой стрелки и прямому вращению фаз трёхфазной системы от А до В и далее к С:

1) Так как начальная фаза А равна 0, $\varphi_A=0$, то вектор \dot{U}_{ab} фазного напряжения фазы А совмещаем с положительной полуосью действительной оси. Векторы фазных напряжений \dot{U}_b и \dot{U}_c фаз В и С строим соответственно под углами 120° и 240° в сторону отставания.

Для построения векторов линейных напряжений геометрически решим систему уравнений (3.1). Рассмотрим построение векторов линейных напряжений на примере построения вектора линейного напряжения \dot{U}_{ab} .

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_a - \dot{U}_b.$$

Из правила вычитания двух векторов известно, что векторная разность будет представлять отрезок прямой, соединяющей концы векторов уменьшаемого и вычитаемого и направленные из вектора вычитаемого в сторону вектора уменьшаемого. Согласно этому на рисунке 3.3 соединяем концы векторов \dot{U}_a и \dot{U}_b и направляем вектор \dot{U}_{ab} от вектора \dot{U}_b к вектору \dot{U}_a .

2) Построение векторных диаграмм токов для соединения потребителей «звездой» и «треугольником» ведём по проекциям, так как комплексы векторов токов вычислены в алгебраической форме. Пояснения по построению фазных и линейных токов для потребителей, соединённых по схеме «треугольник», и векторов фазных токов для потребителей, соединённых по схеме «звезда» не требуется.

3) Определение токов в линейных проводах. Очевидно, что токи в линейных проводах согласно первому закону Кирхгофа, определяются как геометрическая сумма токов в линейном проводе от потребителей, соединённых по схеме «звезда» ($I_\lambda = I_\phi$), и тока в линейном проводе, определяемого системой уравнений (2), от потребителей, соединённых по схеме «треугольник». Покажем нахождение линейного тока в линейном проводе А.

$$\dot{I}_a = \dot{I}_\lambda + \dot{I}_{a\Delta}$$

или воспользовавшись системой (2) и подставив $\dot{I}_{a\Delta} = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}$, получим:

$$\dot{I}_a = \dot{I}_\lambda + \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}.$$

Пояснения к геометрическому решению данного векторного уравнения не требуется.

Аналогично находятся токи в линейных проводах В и С:

$$|\dot{I}_a| = 23,8 \text{ А}; \quad |\dot{I}_b| = 38,4 \text{ А}; \quad |\dot{I}_c| = 20 \text{ А}.$$

Модули величин токов в линейных проводах получены из векторной диаграммы умножением длины отрезка, изображающего вектор тока в линейном проводе, на масштаб векторной диаграммы.

Для построения векторной диаграммы нами были выбраны масштабы:

- для напряжения $m_U = 2$ В/мм;

- для тока $m_I = 0,4$ А/мм.

4) Определение тока в нейтральном проводе.

Согласно первому закону Кирхгофа для нейтральной точки можно записать уравнение:

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c .$$

Разъяснения по решению этого векторного уравнения не требуется. Из векторной диаграммы находим модуль тока в нейтральном проводе:

$$I_0 = 30 \text{ А.}$$

Из векторной диаграммы можно найти начальную фазу тока в нейтральном проводе:

$$\psi_{I_0} = 253,5^\circ = -106,5^\circ.$$

Векторная диаграмма изображена на рисунке 3.3.

Рассмотрим случай, когда нагрузка в приемнике, соединенном по схеме «треугольник», носит емкостной характер. Все остальные параметры соответствуют данным таблицы 3. 2.

Комплексные сопротивления приемников каждый каждой фазы будут иметь вид:

$$\underline{z}_{ab} = \underline{z}_{bc} = \underline{z}_{ca} = z_\phi (\cos \varphi - j \sin \varphi) = (44,7 - j27,7) \text{ Ом.}$$

Фазные токи при соединении потребителей «треугольником»:

$$\dot{I}_{a\Delta} = \frac{330 + j190,5}{44,7 - j27,7} = 7,22e^{j61,8^\circ} = (3,4 + j6,36) \text{ А;}$$

$$\dot{I}_{bc\Delta} = \frac{-j381}{44,7 - j27,7} = 7,22e^{j58,2^\circ} = (3,8 + j6,14) \text{ А;}$$

$$\dot{I}_{ca\Delta} = \frac{-330 + j190,5}{44,7 - j27,7} = 7,22e^{j181,8^\circ} = (-7,22 - j0,22) \text{ А.}$$

Линейные токи при соединении «треугольником»:

$$\dot{I}_{a\Delta} = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} = (3,4 + j6,36) - (-7,22 - j0,22) = (10,62 + j6,58) \text{ А;}$$

$$\dot{I}_{b\Delta} = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} = (3,8 - j6,14) - (3,4 + j6,36) = (0,4 - j12,5) \text{ А;}$$

$$\dot{I}_{c\Delta} = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} = (-7,22 - j0,22) - (3,8 + j6,14) = (-11,02 + j5,92) \text{ A.}$$

Больше изменений в расчетах не произойдет. В результате изменения токов, поступающих в нагрузку, соединенную «треугольник», изменятся линейные токи:

$$\begin{aligned}\dot{I}_a &= \dot{I}_a + \dot{I}_{a\Delta}; \\ \dot{I}_b &= \dot{I}_b + \dot{I}_{b\Delta}; \\ \dot{I}_c &= \dot{I}_c + \dot{I}_{c\Delta}.\end{aligned}$$

Их значения определяются геометрической суммой соответствующих векторов, как и в случае индуктивной нагрузки. Из построенной векторной диаграммы (рисунок 3.4) определяется значение этих токов:

$$\begin{aligned}|\dot{I}_a| &= 23,76 \text{ A}; \\ |\dot{I}_b| &= 38,6 \text{ A}; \\ |\dot{I}_c| &= 21,0 \text{ A}.\end{aligned}$$

Соответствующая векторная диаграмма приведена на рисунке 3.3.

Фазные токи \dot{I}_{ab} , \dot{I}_{bc} и \dot{I}_{ca} строятся под углом $31,8^\circ$ в сторону опережения соответствующих векторов напряжений.

Все остальные построения и расчеты аналогичны случаю индуктивной нагрузки.

Из векторной диаграммы определяются токи:

$$\begin{aligned}I_a &= 23,8 \text{ A}; & \cos\varphi_a &= 0,8; \\ I_b &= 38,6 \text{ A}; & \cos\varphi_b &= 0,984; \\ I_c &= 21,0 \text{ A}. & \cos\varphi_c &= 0,99\end{aligned}$$

и мощности: $P_a = 220 \cdot 23,8 \cdot 0,8 = 4189 \text{ Вт};$

$$P_b = 220 \cdot 38,6 \cdot 0,984 = 8356 \text{ Вт};$$

$$P_c = 220 \cdot 21 \cdot 0,99 = 4573 \text{ Вт};$$

$$P = P_a + P_b + P_c = 4189 + 8356 + 4573 = 17118 \text{ Вт}.$$

Векторная диаграмма приведена на рисунке 3.4.

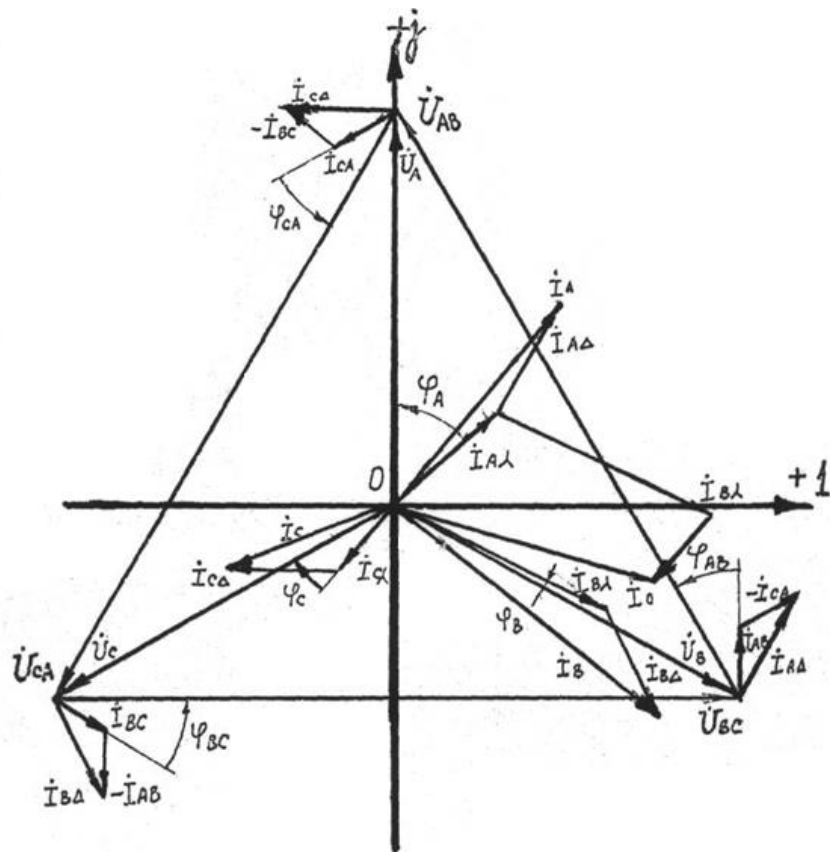


Рисунок 3.3 – Векторная диаграмма для индуктивной нагрузки

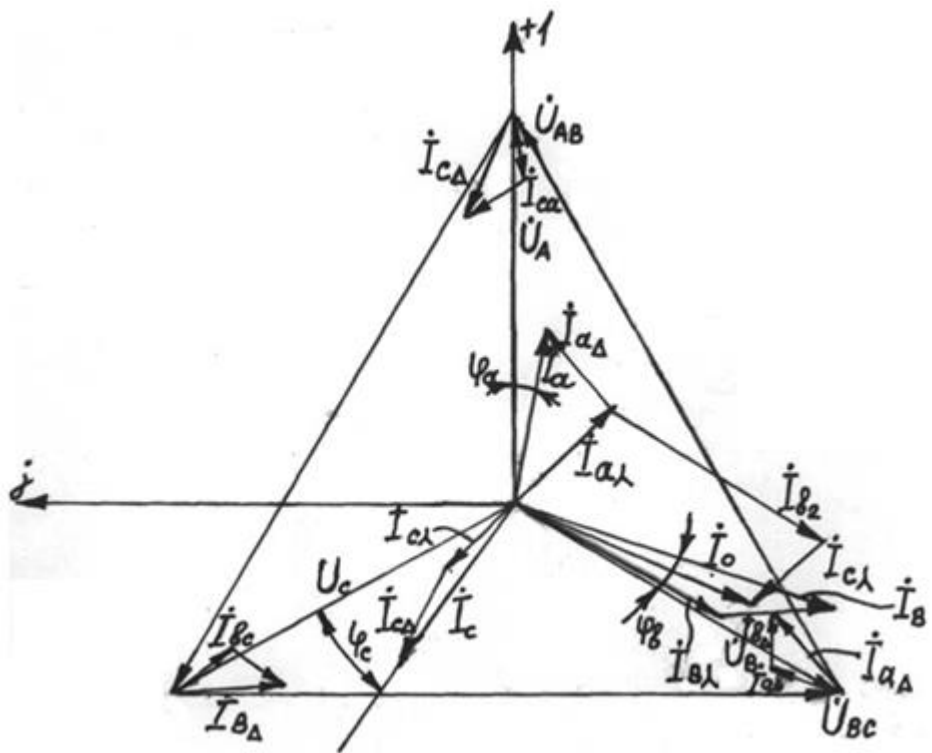


Рисунок 3.4 – Векторная диаграмма при емкостной нагрузке

8 Пример выполнения РГР №4. Расчёт параметров и характеристик трёхфазного трансформатора

Задание по РГР №4.

Трансформатор с соединением обмоток Y/Y^0-0 имеет следующие номинальные данные: полная мощность $S_{\text{НОМ}} = 60$ кВа; напряжение первичной обмотки $U_{1\text{НОМ}} = 10$ кВ; напряжение вторичной обмотки $U_{2\text{НОМ}} = 3,3$ кВ; напряжение короткого замыкания $u_k \% = 4,5\%$; потери при коротком замыкании $P_k = 1470$ Вт; потери при холостом ходе $P_0 = 265$ Вт; ток холостого хода $i_0 \% = 6,5\%$.

Определить:

- номинальные токи в обмотках трансформатора $I_{1\text{НОМ}}, I_{2\text{НОМ}}$;
- коэффициент мощности холостого хода $\cos\varphi_0$;
- коэффициент мощности короткого замыкания $\cos\varphi_k$;
- сопротивления первичной R_1, X_1 и вторичной R_2, X_2 обмоток;
- сопротивления намагничивающей цепи R_0, X_0 ;
- максимальный КПД трансформатора η_{max} .

Построить:

- внешнюю характеристику трансформатора $U_2 = f(\beta)$ и зависимость $\eta = f(\beta)$ при активно-индуктивной нагрузке и коэффициенте мощности $\cos\varphi_2 = 0,8$.

Решение. Номинальные токи первичной и вторичной обмоток:

$$I_{1\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{1\text{НОМ}}} = \frac{60 \cdot 10^3}{1,732 \cdot 10^4} = 3,464 \text{ А};$$
$$I_{2\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{2\text{НОМ}}} = \frac{60 \cdot 10^3}{1,732 \cdot 3,3 \cdot 10^4} = 10,498 \text{ А}.$$

Коэффициенты мощности:

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U_{1\text{НОМ}} \cdot I_0} = \frac{265}{1,732 \cdot 10^4 \cdot 0,225} = 0,068,$$

где $I_0 = \frac{I_{1\text{НОМ}} \cdot i_0 \%}{100} = \frac{3,464 \cdot 6,5}{100} = 0,225 \text{ А}$ - ток холостого хода;

$$\cos\varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3} \cdot U_k \cdot I_{k\phi}} = \frac{P_k}{\sqrt{3} \cdot \frac{U_{1\text{НОМ}} \cdot u_k \%}{100} \cdot I_{k\phi}} = \frac{1470}{1,732 \cdot \frac{10^4 \cdot 4,5}{100} \cdot 3,464} = 0,544,$$

где $I_{k\phi} = I_{1\text{НОМ}}$ - фазный ток опытного короткого замыкания, когда при замкнутой накоротко вторичной обмотке напряжение первичной обмотки устанавливают таким, чтобы токи фаз были равны номинальным значениям.

Активное R_k , индуктивное X_k , полное Z_k сопротивления короткого замыкания:

$$R_K = \frac{P_K}{3 \cdot I_{K\Phi}^2} = \frac{1470}{3 \cdot 3,464^2} = 40,836 \text{ Ом};$$

$$X_K = \frac{U_{p\Phi}}{I_{K\Phi}} = \frac{u_p \% \cdot U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot I_{K\Phi}} = \frac{3,776 \cdot 10^4}{1,732 \cdot 100 \cdot 3,464} = 62,933 \text{ Ом},$$

где $X_K = \frac{U_{p\Phi}}{I_{K\Phi}} = \frac{u_p \% \cdot U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot I_{K\Phi}} = \frac{3,776 \cdot 10^4}{1,732 \cdot 100 \cdot 3,464} = 62,933$ - реактивная составляющая напряжения короткого замыкания, $\varphi_K = \arccos 0,544 = 57,044$;

$$Z_K = \sqrt{R_K^2 + X_K^2} = \sqrt{40,836^2 + 62,933^2} = 75,021 \text{ Ом}.$$

Сопротивления первичной обмотки:

$$R_1 = R_2' = \frac{R_K}{2} = \frac{40,836}{2} = 20,418 \text{ Ом};$$

$$X_1 = X_2' = \frac{X_K}{2} = \frac{62,933}{2} = 31,466 \text{ Ом}.$$

Сопротивления вторичной обмотки:

$$R_2 = \frac{R_2'}{k^2} = \frac{20,418}{3,03^2} = 2,223 \text{ Ом}; \quad X_2 = \frac{X_2'}{k^2} = \frac{31,466}{3,03^2} = 3,427 \text{ Ом},$$

где $k = \frac{w_1}{w_2} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{U_{2\text{НОМ}}} = \frac{10^4}{3,3 \cdot 10^3} = 3,03$ - коэффициент трансформации.

Сопротивления намагничивающей цепи:

$$Z_0 = \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot I_0} = \frac{10^4}{1,732 \cdot 0,225} = 25660,765 \text{ Ом};$$

$$R_0 = \frac{P_0}{3 \cdot I_0^2} = \frac{265}{3 \cdot 0,225^2} = 1744,569 \text{ Ом};$$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = \sqrt{25660,765^2 - 1744,569^2} = 25601,393 \text{ Ом}.$$

Максимальное значение КПД:

$$\eta_{\text{MAX}} = \frac{\beta_{\text{MAX}} \cdot S_{\text{НОМ}} \cdot \cos \phi_2}{\beta_{\text{MAX}} \cdot S_{\text{НОМ}} \cdot \cos \phi_2 + \beta_{\text{MAX}}^2 \cdot P_K + P_0} =$$

$$= \frac{0,425 \cdot 60 \cdot 10^3 \cdot 0,8}{0,425 \cdot 60 \cdot 10^3 \cdot 0,8 + 0,425^2 \cdot 1470 + 265} = 0,9747,$$

где $\beta_{\text{MAX}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_K}} = \sqrt{\frac{265}{1470}} = 0,425$ - значение коэффициента нагрузки, при котором КПД трансформатора достигает максимума.

Напряжение на зажимах вторичной обмотки:

$$U_2 = \frac{U_{2\text{НОМ}} \cdot (100 - \Delta U_2 \%) }{100},$$

где $\Delta U_2 \% = \beta \cdot (U_{\text{ак}} \% \cdot \cos \varphi_2 + U_{\text{рк}} \% \cdot \sin \varphi_2)$ - изменение вторичного напряжения в зависимости от нагрузки;

$U_{\text{ак}} \% = U_{\text{к}} \% \cdot \cos \varphi_{\text{к}} = 4,5 \cdot \cos 57^\circ,044 = 2,448$ - активная составляющая напряжения короткого замыкания.

Например, при $\beta = 0,1$ и $\cos \varphi_2 = 0,8$:

$$\Delta U_2 \% = 0,1 \cdot (2,448 \cdot 0,8 + 3,776 \cdot 0,6) = 0,4224;$$

$$U_2 = \frac{3300 \cdot (100 - 0,4224)}{100} = 3286,06 \text{ В};$$

$$\eta_{0,1} = \frac{0,1 \cdot 60 \cdot 10^3 \cdot 0,8}{0,1 \cdot 60 \cdot 10^3 \cdot 0,8 + 0,1^2 \cdot 1470 + 265} = 0,945.$$

Результаты расчёта $\Delta U_2 \%$, U_2 , η при изменении β от 0,2 до 1 представлены в таблице 4.1, а на рисунке 4.1 приведены зависимости $U_2 = f(\beta)$ и $\eta = f(\beta)$.

Таблица 4.1

β	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\Delta U_2 \%$	0,8448	1,2672	1,6896	2,112	2,5344	2,9568	3,3792	3,8016	4,224
$U_2, \text{В}$	3272	3258,2	3244,2	3230,3	3216,4	3202,4	3188,5	3174,5	3160,6
η	0,9674	0,9731	0,9746	0,9743	0,9732	0,9715	0,9696	0,9674	0,9651

Примечание - при $\beta = 0,05$ КПД $\eta_{0,05} = 0,8993$.

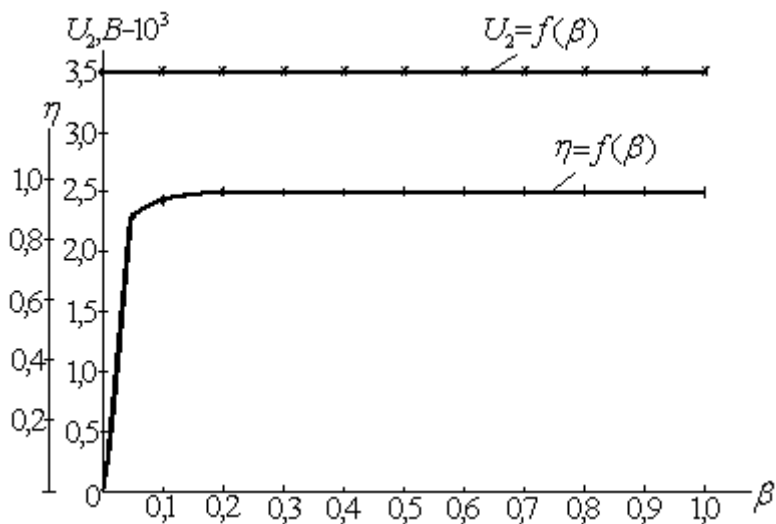


Рисунок 4.1 – Внешняя характеристика $U_2 = f(\beta)$ и зависимость $\eta = f(\beta)$

Список литературы

- 1 Электрические цепи и электромагнитные устройства: Методические указания к выполнению расчетно-графических работ по дисциплинам «Электротехника и электроника» и «Общая электротехника и электроника» / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; Сост.: Р.В. Ахмадеев, И.В. Вавилова, П.А. Грахов, Т.М. Крымская, О.В. Мельничук.-Уфа, 2012. – 84 с.
- 2 Задания и методические указания к выполнению семестровой работы /Сост. канд. тех. наук, доцент С.И. Николаева, Волгоград. гос. ун-т. – Волгоград, 2005. -24 с.
- 3 Иванов И.И. Электротехника и основы электроники. – СПб.: Лань, 2012. – 730 с.
- 4 Белов Н.В. Электротехника и основы электроники. – СПб.: Лань, 2012. – 730 с.
- 5 Баймаганов А.С., Амиров Ж.Х. Электротехника и электроника. Методические указания к выполнению расчетно-графических работ № 1 -4 – Алматы: АУЭС, 2013. – 15 с.

Содержание

Введение.....	3
1 Расчетно - графическая работа №1. Расчет линейных цепей постоянного тока.....	4
2 Расчетно - графическая работа №2. Расчет линейной электрической цепи однофазного синусоидального тока со смешанным соединением приемников.....	5
3 Расчетно - графическая работа №3. Расчет трехфазной цепи синусоидального тока.....	8
4 Расчетно - графическая работа №4. Расчёт параметров и характеристик трёхфазного трансформатора	10
5 Пример выполнения РГР №1. Расчет линейных цепей постоянного тока.....	11
6 Пример выполнения РГР №2. Расчет линейной электрической цепи однофазного синусоидального тока со смешанным соединением приемников.....	19
7 Пример выполнения РГР №3. Расчет трехфазной цепи синусоидального тока.....	25
8 Пример выполнения РГР №4. Расчёт параметров и характеристик трёхфазного трансформатора	34
Список литературы.....	37

Исабай Танирбергонович Алдибеков
Макпал Бексұлтановна Жаркымбекова
Эльмира Байджумаевна Даркенбаева

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Методические указания по выполнению расчетно - графических работ
для студентов специальности 5В071700 - Теплоэнергетика

Редактор Н.М. Голева
Специалист по стандартизации Н.К. Молдабекова

Подписано в печать _____
Тираж 20 экз.
Объем 2,6 уч. – изд.

Формат 60x84 1/16
Бумага типографическая №1
Заказ _____ Цена 1300 тг.

Копировально – множительное бюро
некоммерческого акционерного общества
«Алматинский университет энергетики и связи»
050013, Алматы, ул. Байтурсынова, 126