

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Ижевский государственный технический
университет имени М. Т. Калашникова»
Кафедра «Ракетостроение»

**Практические занятия и расчетно-графические работы
по курсу «Электротехника и электроника» - раздел «Электротехника»**

**Учебно-методическое пособие для выполнения практических работ
для студентов специальности:**

24.05.01 – Проектирование, производство и эксплуатация ракет
и ракетно-космических комплексов (квалификация «специалитет»)

15.03.05 – Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств (квалификация «бакалавр»),

09.03.01 – Информатика и вычислительная техника, профиль «Автоматизированные системы обработки информации и управления» (квалификация «бакалавр»)

08.03.01 – Строительство, профиль «Промышленное и гражданское строительство (квалификация «бакалавриат»))».

Составитель: М.А. Святский

Издательство ВФ ИжГТУ
имени М.Т. Калашникова

Воткинск 2020

УДК 621.382 (С25)
ББК 32.966

Рецензент

А.Н. Шельпяков, канд. техн. наук, доцент кафедры «Технология машиностроения и приборостроения» ВФ
ИжГТУ имени М.Т. Калашникова

Составитель

М.А. Святский, канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетостроение» ВФ ИжГТУ имени М.Т. Калашникова

**Практические занятия и расчетно-графические работы
по курсу «Электротехника и электроника» - раздел «Электротехника»**

Методические указания по дисциплине «Электротехника и электроника» - раздел «Электротехника» представляют собой сборник практических занятий и заданий, которые изложены в восьми основных разделах изучаемой дисциплины:

1. Методы преобразования элементов и цепей и определение их эквивалента;
2. Оценка параметров эквивалентного источника и нагрузки в цепи;
3. Оценка параметров разветвленной цепи с источниками постоянной ЭДС;
4. Оценка параметров неразветвленной цепи с источником синусоидальной ЭДС;
5. Оценка параметров разветвленной цепи с источником синусоидальной ЭДС;
6. Оценка параметров трехфазных цепей с различными типами нагрузками;
7. Оценка потребления электрической мощности цеха и методы ее экономии;
8. Оценка параметров однофазного трансформатора небольшой мощности.

По каждой теме кратко изложены теоретические положения и дана методика решения 2-х – 3-х примеров расчета параметров схем автоматики.

Методические указания предназначены для студентов специальности:

24.05.01 – Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов (квалификация «специалитет»),

15.03.05 – Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств (квалификация «бакалавр»),

09.03.01 – Информатика и вычислительная техника, профиль «Автоматизированные системы обработки информации и управления» (квалификация «бакалавр»).

08.03.01 – Строительство, профиль «Промышленное и гражданское строительство (квалификация «бакалавриат»))».

Учебно-методическое пособие рассмотрено на заседании кафедры «Ракетостроение» (протокол № 2 от 24.01.2020) и рекомендовано к изданию в открытой печати методическим советом ВФ ИжГТУ имени М. Т. Калашникова.

Протокол № _____ от «___» _____ 2020г.

УДК 621
ББК 32.966

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания к практическим занятиям и расчетно-графическим работам по дисциплине «Электротехника и электроника» – раздел «Электротехника» представляют собой сборник практических занятий и заданий и предназначены для студентов технических специальностей, обучающихся в Воткинском филиале ИжГТУ имени М.Т. Каашникова.

Цель методических указаний – обучить студентов методам и правилам расчетов, а также способствовать приобретению умений и навыков анализа электрических цепей. Освоение методов решения задач позволяет студенту успешно преодолеть трудности, возникающие при изучении дисциплины «Электротехника и электроника» - раздел «электротехника». Решение задач помогает понять физические явления, происходящие в электрических цепях, усвоить способы расчета и укрепить навыки практического применения теоретических знаний по дисциплине «Электротехника и электроника» - раздел «электротехника».

Приведенные примеры отражают приемы и методы расчета параметров электрических цепей разной сложности.

Методические указания построены по принципу деления на изучаемые темы.

Здесь приведены примеры решения задач по следующим темам дисциплины «Электротехника и электроника» - раздел «электротехника».

- 1) методы преобразования цепей и элементов и определение их эквивалента;
- 2) оценка параметров эквивалентного источника и нагрузки в цепи;
- 3) оценка параметров разветвленной цепи с источниками постоянной ЭДС;
- 4) оценка параметров неразветвленной цепи с источником синусоидальной ЭДС;
- 5) оценка параметров разветвленной цепи с источником синусоидальной ЭДС;
- 6) оценка параметров трехфазных цепей с различными типами нагрузками;
- 7) оценка потребления электрической мощности цепи и методы ее экономии;
- 8) оценка параметров однофазного трансформатора небольшой мощности.

Методические указания к проведению расчетно-графических работ по курсу «Электротехника и электроника» - раздел «электротехника» можно рекомендовать к применению для специальности 24.05.01, 15.03.05, 09.03.01 и 08.03.01.

Поскольку в рабочих программах специальности 24.05.01, 15.03.05, 09.03.01 и 08.03.01 предусмотрен различный объем часов нагрузки, то для каждой специальности выполняется индивидуальный перечень занятий и заданий для решения.

Обычно, на аудиторных занятиях по изучаемой теме рассматриваются 2 – 3 примера, где студенты знакомятся с методами расчета типовых задач, а затем они выполняют индивидуальные расчетно-графические или контрольные работы (РГР).

По каждой теме приведено 2 задания, каждое из которых содержит 30 вариантов индивидуальных задач. Эти задачи предполагают аналитическое ведение расчета параметров схем, построение графических зависимостей и проверку результатов расчета. Для построения и анализа схем предполагается использование программ моделирования электронных схем, (например, EWB, MC, PROTEUS).

Номер задания в РГР для студента соответствует номеру записи в журнале группы.

Номер варианта в индивидуальном задании по каждой изучаемой теме РГР соответствует номеру рисунка и текущему номеру в таблице исходных параметров.

ТЕМА №1

Методы преобразования цепей и определение их эквивалента (8с)

Цель занятия: приобретение умений и навыков оценки параметров элементов в схемах, соединенных последовательно, параллельно или смешанно и методов преобразования схем, с целью их упрощения и определения эквивалентного элемента.

Преобразования основаны на упрощении схемы (модели) электрической цепи с целью получения эквивалента, параметры которого аналогичны исходной схеме.

1.1. Методы преобразования сложной цепи и определение её эквивалента

Для упрощения схемы со смешанным соединением выбирают узел или контур. Например, преобразуют схему звезда в схему треугольник или наоборот, а затем для упрощенной схемы определяют эквивалентный параметр.

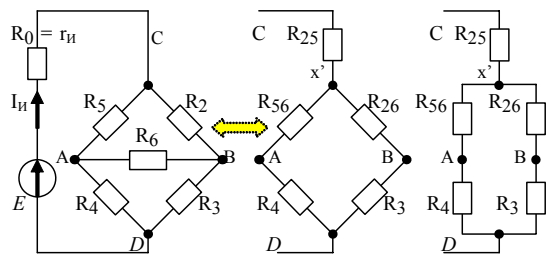


Рис. 1.1. Мостовая цепь и способ ее преобразования

Пример 1.1. Для цепи (рис. 1.1) требуется определить полное сопротивление $R_{ЭКВ.СД}$ и ток $I_{и}$ преобразовав цепь из треугольника ABC (R_2, R_5, R_6) в цепь звезды (R_{25}, R_{26}, R_{56}).

$$R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = 10(\text{Ом}).$$

$$R_{25} = (R_2 + R_5) + [(R_2 \cdot R_5) / R_6] = 30;$$

$$R_{26} = (R_2 + R_6) + [(R_2 \cdot R_6) / R_5] = 30;$$

$$R_{56} = (R_5 + R_6) + [(R_5 \cdot R_6) / R_2] = 30. \quad \text{При } E = 5,1 \text{ В}, \quad I_{и} = E / R_{ЭКВ.СД} = 0,1 \text{ А}.$$

$$R_{ЭКВ.СД} = R_{25} + [(R_{56} + R_4)(R_{26} + R_3)] / [(R_{56} + R_4 + R_{26} + R_3)] = 30 + 20 = 50 (\text{Ом}).$$

Если в схеме 1.1 вместо резисторов включены катушки индуктивностью L , то расчет эквивалента $L_{Э}$ выполняют аналогично резисторам [4]. Для подобных схем содержащих конденсаторы, способ расчета приведен в примере 1.2.

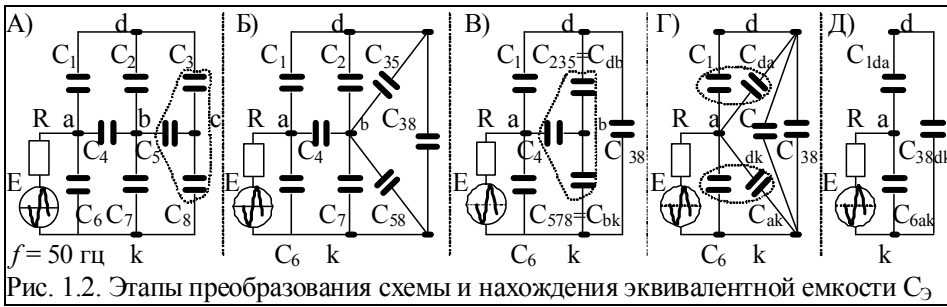


Рис. 1.2. Этапы преобразования схемы и нахождения эквивалентной емкости C_3

Пример 1.2. Пример определения эквивалентной емкости C_3 для схемы рис. 1.3.

Решение. Рассмотрим пример преобразования из схемы звезда в схему треугольник и обратно. Например, выполним замену емкостей C_3, C_5, C_8 , соединенных по схеме звезда (рис. 1.3,а), в эквивалентное соединение по схеме треугольник C_{35}, C_{58}, C_{38} (рис.1.2,б). Аналогично, выполним обратное преобразование – из схемы треугольник (рис.1.2,б - C_{35}, C_{58}, C_{38}), в схему звезда (рис.1.2,а - C_3, C_5, C_8).

$$\begin{cases}
 C_{35} = C_3 \cdot C_5 / (C_4 + C_5 + C_8); \\
 C_{58} = C_5 \cdot C_8 / (C_3 + C_5 + C_8); \\
 C_{38} = C_3 \cdot C_8 / (C_3 + C_5 + C_8);
 \end{cases}
 \quad
 \begin{cases}
 C_{35} = (C_3 + C_5) + (C_3 \cdot C_5 / C_8); \\
 C_{58} = (C_5 + C_8) + (C_3 \cdot C_5 / C_8); \\
 C_{38} = (C_3 + C_8) + (C_3 \cdot C_8 / C_5).
 \end{cases}
 \quad (\Delta \rightarrow Y)$$

После преобразования найдем эквивалентное реактивное X_3 или полное Z_3 сопротивление всей цепи, например, при последовательном их включении.

$$X_{C,3} = 1 / (2 \cdot \pi \cdot f(\mu\text{Ф}) \cdot C(\Phi)), (\text{Ом}); \quad X_{L,3} = (2 \cdot \pi \cdot f(\text{ГГц}) \cdot L(\text{Гн})), (\text{Ом}); \quad Z_3 = \sqrt{R^2 + X_3^2}, (\text{Ом});$$

$$\text{Для } RL \text{ или } RC \text{ элементов, включенных параллельно: } Z_3 = \sqrt{R^2 \cdot X_3^2 / (R^2 + X_3^2)} (\text{Ом}).$$

Пример 1.3. Определить параметры цепи (схема - рис.1.3) методом узлового напряжения и построить потенциальную диаграмму для приведенной схемы.

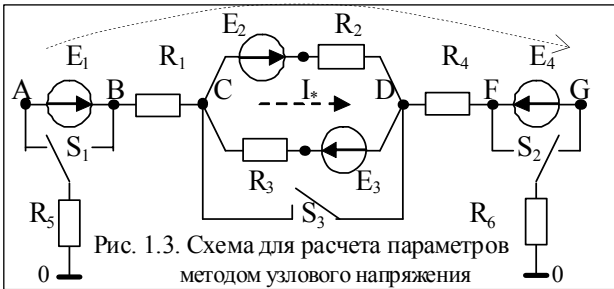


Рис. 1.3. Схема для расчета параметров методом узлового напряжения

$$\begin{aligned}
 R_1 = 20; R_2 = 10; R_3 = 15; \\
 R_4 = 9; R_5 = 10; R_6 = 5 (\text{Ом}); \\
 E_1 = 15; E_2 = 6; E_3 = 8 (\text{В}); \\
 E_4 = 5,66 (\text{В});
 \end{aligned}$$

Положение ключей S_1 и S_2 – в положение ‘А’ и ‘G’; ключ S_3 – отключен.

Найти: $I_A = ? I_G = ?$

$$U_{AG} = ? \rightarrow U_{Ri} = ?$$

Решение. Вначале определим эквивалентное напряжение на участке CD:

$$E_{CD} = (E_2/r_2 - E_3/r_3) / [(1/r_2) + (1/r_3)] = [(6/10) - (8/20)] / [(1/10) + (1/20)];$$

$$E_{CD} = (0,6 - 0,4) / 0,15 = 1,33 \text{ В. } R_{CD} = (R_2 \cdot R_3) / (R_2 + R_3) = 6 (\text{Ом}).$$

2) Определим эквивалентное напряжение и ток при направлении обхода: $A \rightarrow G$:

$$E_{ЭКВ} = E_1 - E_{CD} - E_4 = 8 \text{ В. } I = E_{ЭКВ} / R_{ЭКВ} = 8 / (10 + 20 + 6 + 9 + 5) = 0,16 \text{ А.}$$

$$U_{AG} = E_1 - (I \cdot R_1) - E_{CD} - (I \cdot R_{CD}) - (I \cdot R_4) - E_4 = +2,4 \text{ В.}$$

Определим разности потенциалов ($\varphi_i - \varphi_j$) между соседними точками:

$$\varphi_0 - \varphi_A - I \cdot R_5 = 0; \quad \varphi_A = \varphi_0 - I \cdot R_5; \quad \varphi_A = 0 - 0,16 \cdot 10. \quad \varphi_A = -1,6 \text{ в.}$$

$$\varphi_A - \varphi_B + E_1 = 0; \quad \varphi_B = \varphi_A + E_1. \quad \varphi_B = -1,6 + 15. \quad \varphi_B = +13,4 \text{ в.}$$

$$\varphi_B - \varphi_C - I \cdot R_1 = 0; \quad \varphi_C = \varphi_B - I \cdot R_1. \quad \varphi_C = +13,4 - 3,2. \quad \varphi_C = +10,2 \text{ в.}$$

и т. д., до точки φ_G , после чего строят потенциальную диаграмму для схемы.

Варианты задач, используемых в контрольной, при зачете или экзамене

Определить параметры цепи (рис. 1.3) методом узлового напряжения:

1) $R_1 = 2; R_2 = 12; R_3 = 5; R_4 = 8; R_5 = 15; R_6 = 9 (\text{Ом}); E_1 = 15; E_2 = 8; E_3 = 8; E_4 = 16 (\text{В}).$

Переключатели S_1 и S_2 – включены в положение ‘В’ и ‘G’; S_3 – включен.

2) $R_1 = 10; R_2 = 15; R_3 = 20; R_4 = 18; R_5 = 20; R_6 = 8 (\text{Ом}); E_1 = 12; E_2 = 6; E_3 = 4; E_4 = 8 (\text{В}).$

Переключатели S_1 и S_2 – включены в положение ‘В’ и ‘G’; S_3 – отключен.

3) $R_1 = 20; R_2 = 15; R_3 = 10; R_4 = 5; R_5 = 13; R_6 = 15 (\text{Ом}); E_1 = 7; E_2 = 8; E_3 = 9; E_4 = 10 (\text{В}).$

Переключатели S_1 и S_2 – включены в положение ‘А’ и ‘F’; S_3 – включен.

4) $R_1 = 22; R_2 = 11; R_3 = 15; R_4 = 9; R_5 = 10; R_6 = 5 (\text{Ом}); E_1 = 5; E_2 = 12; E_3 = 6; E_4 = 6 (\text{В}).$

Переключатели S_1 и S_2 – включены в положение ‘А’ и ‘F’; S_3 – отключен.

5) $r_1 = 12; r_2 = 10; r_3 = 18; r_4 = 16; r_5 = 16; r_6 = 8 (\text{Ом}); E_1 = 2; E_2 = 9; E_3 = 13; E_4 = 11 (\text{В}).$

Переключатели S_1 и S_2 – включены в положение ‘В’ и ‘F’; S_3 – включен.

6) $R_1 = 4; R_2 = 21; R_3 = 14; R_4 = 6; R_5 = 20; R_6 = 10 (\text{Ом}); E_1 = 4; E_2 = 10; E_3 = 6; E_4 = 16 (\text{В}).$

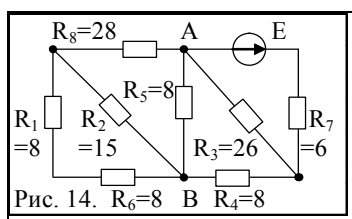
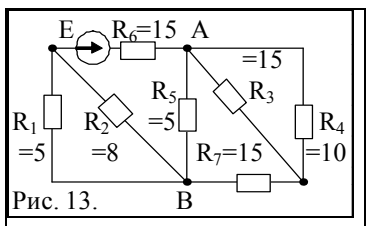
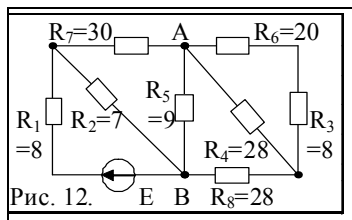
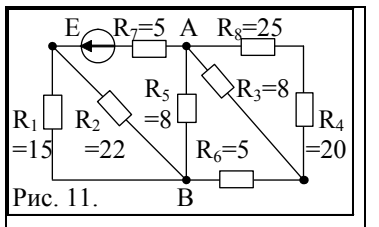
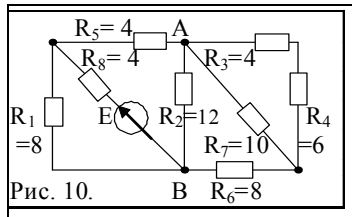
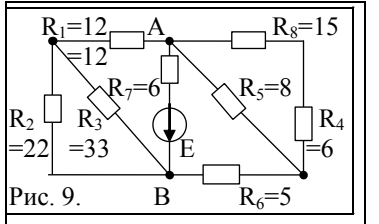
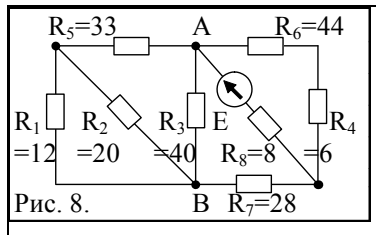
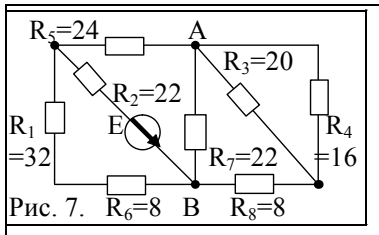
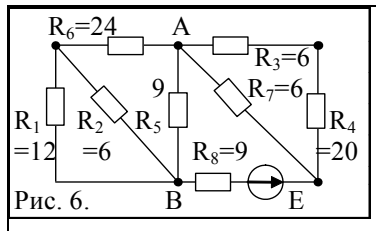
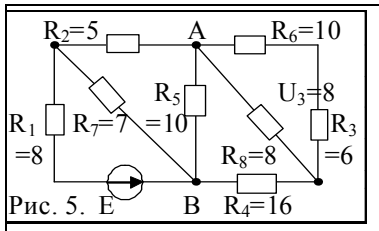
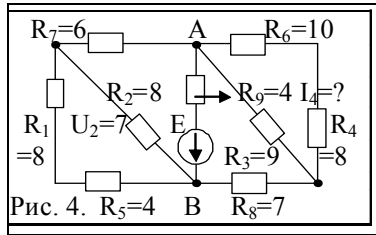
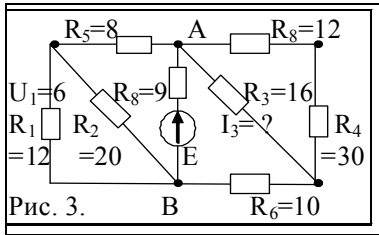
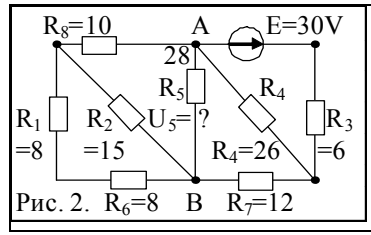
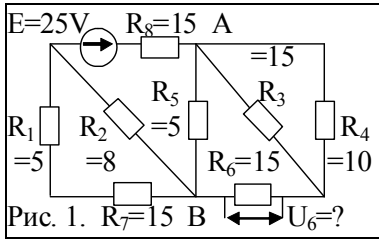
Переключатели S_1 и S_2 – включены в положение ‘В’ и ‘F’; S_3 – отключен.

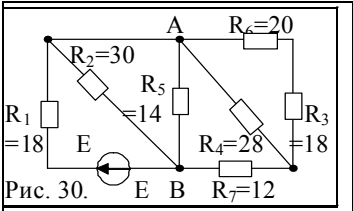
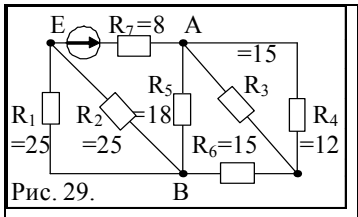
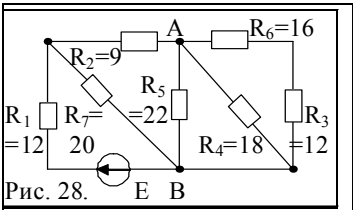
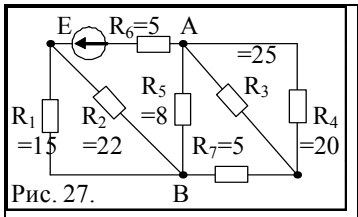
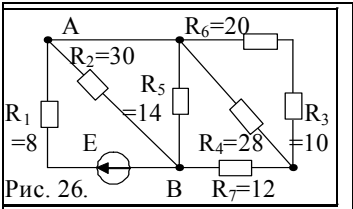
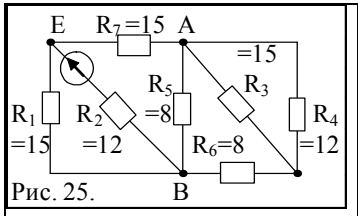
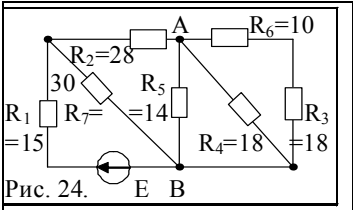
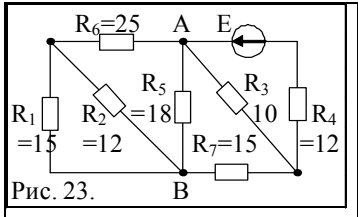
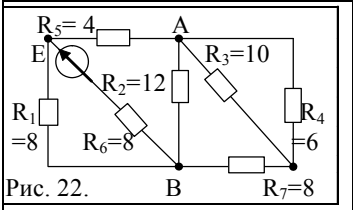
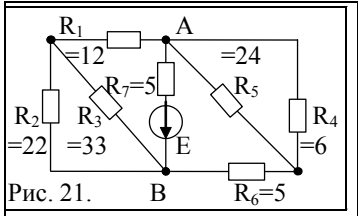
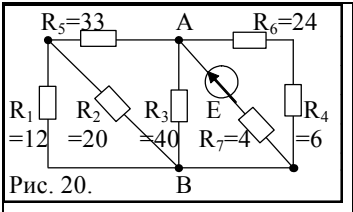
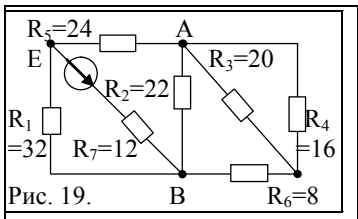
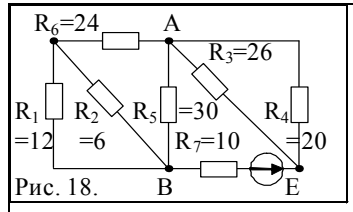
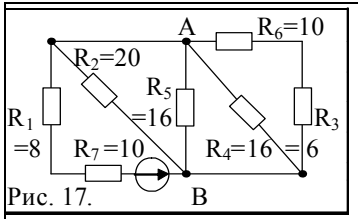
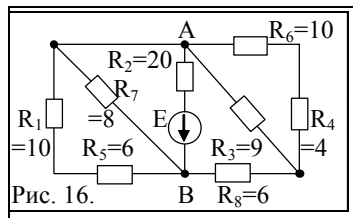
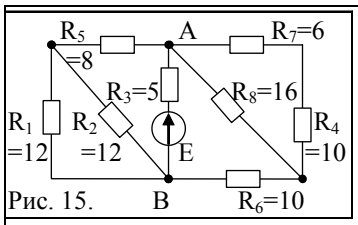
РГР № 1.1. Задачи для самостоятельного решения – для группы №1

Расчет параметров разветвленной цепи с одним источником

1. Определить величину параметра схемы, используя значение другой величины
2. Номер варианта задания соответствует номеру рисунка.

Вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Дано	$E = 25$	$E = 30$	$U_1 = 6$	$U_2 = 7$	$U_3 = 8$	$U_4 = 9$	$U_5 = 5$	$U_6 = 6$	$E = 9$	$E = 12$	$I_1 = 2$	$I_2 = 3$	$I_4 = 3$	$I_2 = 3$	$I_2 = 3$
Найти	U_6	U_5	I_3	I_4	I_7	E	I_6	I_5	I_5	I_6	U_6	E	U_1	U_4	U_4
Вар	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Дано	$I_3 = 4$	$I_4 = 2$	$I_5 = 1$	$I_6 = 0,5$	$U_1 = 24$	$I_2 = 2$	$U_3 = 10$	$I_4 = 1,5$	$U_5 = 12$	$I_6 = 3$	$U_4 = 15$	$U_6 = 10$	$I_4 = 4$	$U_2 = 12$	$U_2 = 8$
Найти	U_2	U_7	U_7	U_1	E	E	I_1	I_6	U_1	I_7	E	I_3	E	I_3	I_7





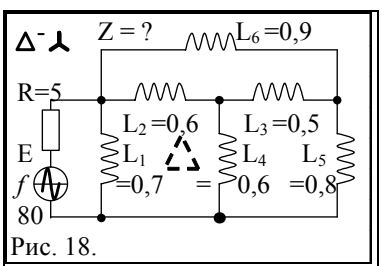
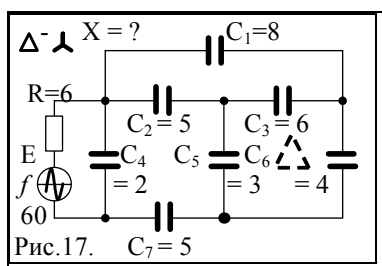
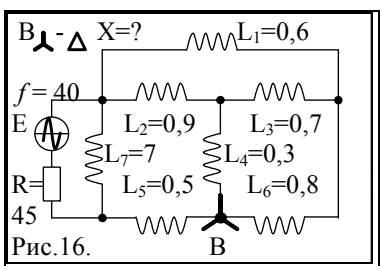
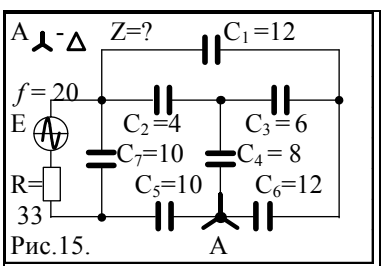
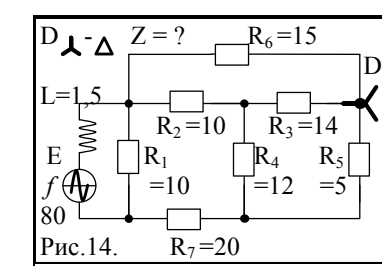
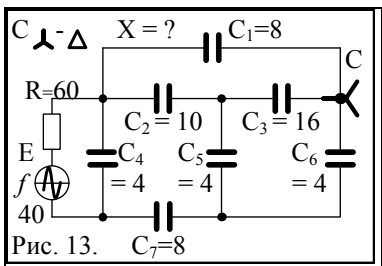
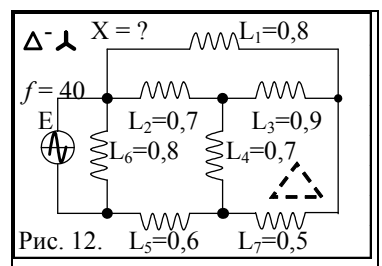
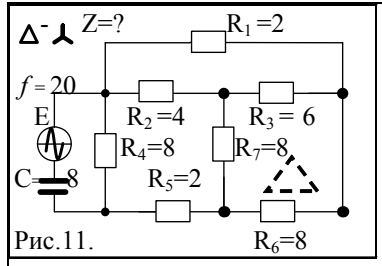
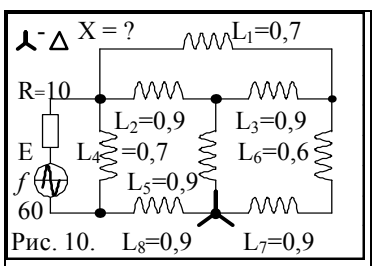
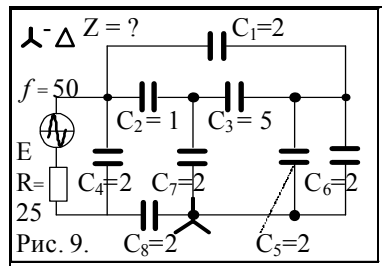
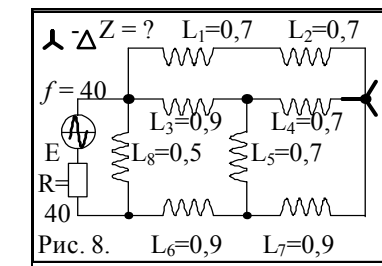
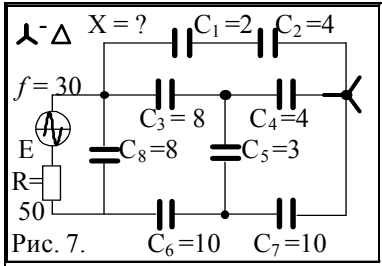
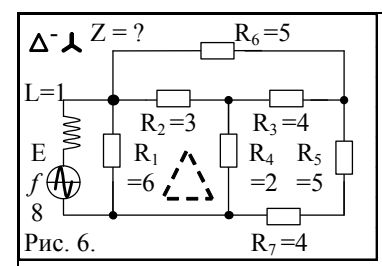
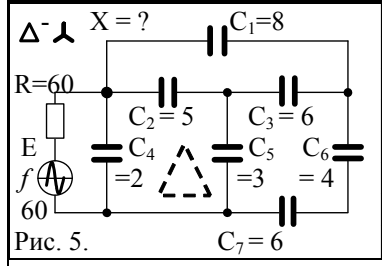
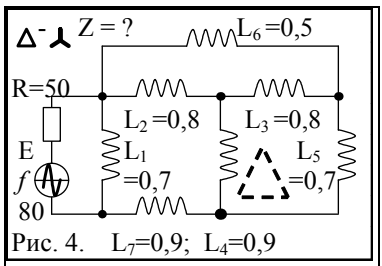
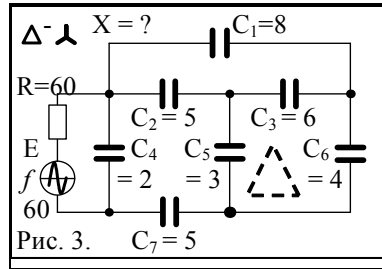
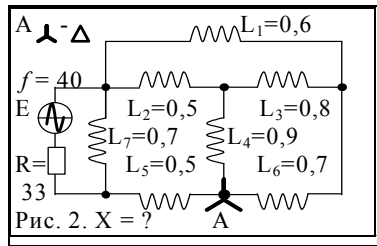
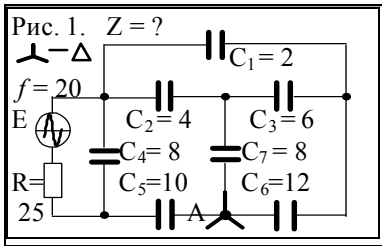
Рекомендуемая литература

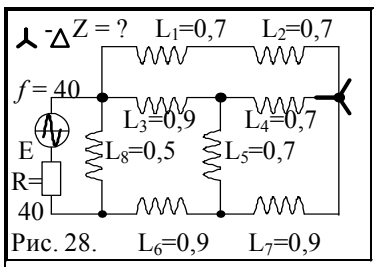
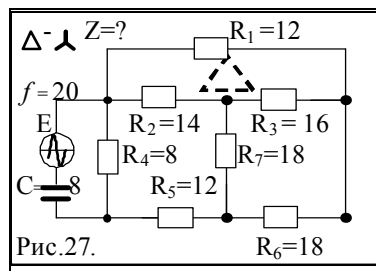
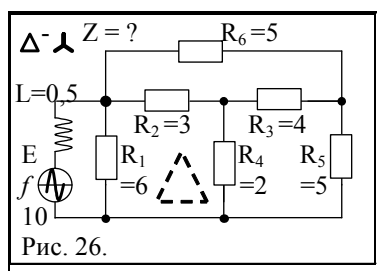
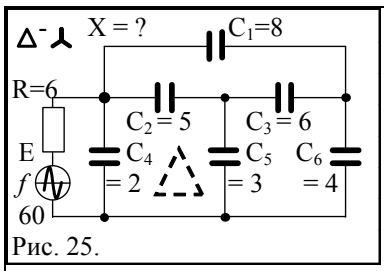
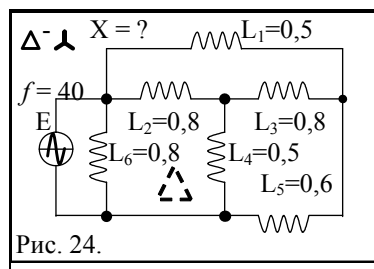
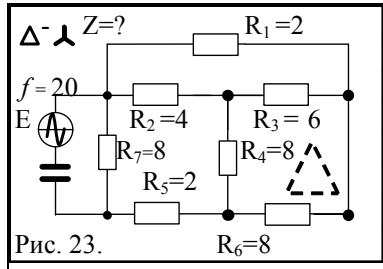
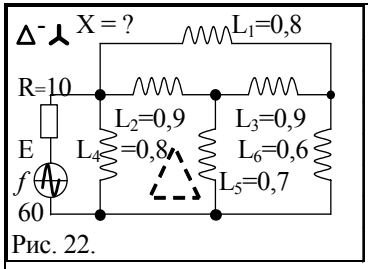
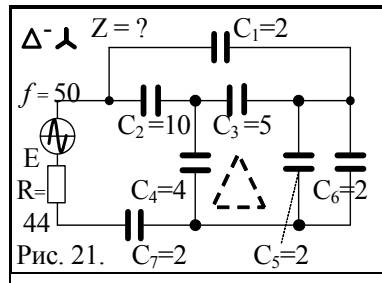
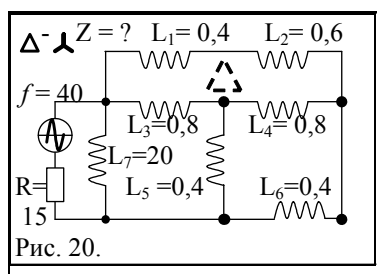
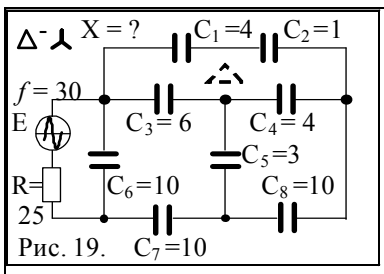
1. Рекус Г.Г. Основы электротехники и промышленной электроники в примерах и задачах с решениями: Учебное пособие. – М.: Высш. шк., 2008. – 343 с.
2. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. – М.: Высш. шк., 2003. – 540 с.
3. Сборник задач по электротехнике и основам электроники / Под ред. В.Г. Герасимова. – М.: Высш. шк., 1987. - 288 с.
4. Березкина Т.Ф., Гусев В.Г. Задачник по общей электротехнике с основами электроники. – М.: Высш. шк., 1983. - 368с.

РГР № 1.2. Задачи для самостоятельного решения - для группы №1.

Расчет эквивалентного параметра схемы методом ее преобразования.

1. Определить эквивалентный параметр (X или Z) схемы после преобразования ($\Delta \rightarrow Y$ или $Y \rightarrow \Delta$) отмеченного буквой (или символом) на данном участке схемы.
2. Показать графически последовательность преобразования исходной схемы.
3. Варианты задания соответствуют номерам, приведенным в рисунках.
4. Величины параметров элементов: $R = [\text{Ом}]$; $C = [\text{МкФ}]$; $L = [\text{Гн}]$.





ТЕМА №2

Оценка параметров эквивалентного источника и нагрузки в цепи (9)

Цель занятия: приобретение умений и навыков преобразования параметров электрической цепи с целью определения параметров эквивалентного генератора и анализа его работы в режиме холостого хода, а также короткого замыкания.

Пример 2.1. Определить ток в диагонали моста методом эквивалентного генератора для моста Уитстона: $E = 6$ (В); $R_1 = R_2 = 10$; $R_3 = 40$; $R_4 = 20$; $R_5 = 21,7$ (кОм);

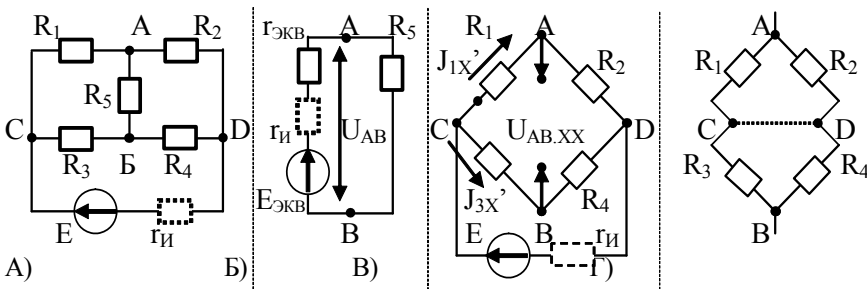


Рис. 2.1. Схема моста (А), ее эквивалент (Б), и условия определения R моста.

Решение. В соответствии с теоремой об эквивалентном генераторе - воздействие всей цепи на рассматриваемую ветвь с (r_5) можно заменить воздействием эквивалентного генератора (рис. 2.1,б), у которого $E_{ЭКВ} = U_{AB,XX}$; $r_{ЭКВ} = r_{AB,XX} = r_{ВЫХ}$.

Для определения $U_{AB,XX}$ разомкнем ветвь с резистором (r_5): (рис. 2.1.в)

$$U_{AB,XX} = r_3 \cdot I_{3,X} - r_1 \cdot I_{1,X} = [r_3 / (r_3 + r_4)] E - [r_1 / (r_1 + r_2)] E = [40 / (40 + 20)] 6 - [10 / (10 + 10)] 6 = 1 \text{ В.}$$

Эквивалентное сопротивление $r_{ЭКВ} = r_{AB,XX} = r_{ВЫХ}$ определим по схеме (рис. 2.1.г):

$$r_{ЭКВ} = r_{AB,XX} = [r_1 \cdot r_2 / (r_1 + r_2)] + [r_3 \cdot r_4 / (r_3 + r_4)] = [10 \cdot 10 / (10 + 10)] + [40 \cdot 20 / (40 + 20)] = 18,3 \text{ (Ом).}$$

Ток (I_5) в диагонали моста (А-Б): $I_5 = E_{ЭКВ} / (r_{ЭКВ} + r_5) = 1 / (18,3 + 21,7) = 0,025 \text{ (А).}$

Определим входное сопротивление схемы моста (АВ – замкнут; СD разомкнут):

$$r_M = r_{ВХ} = (r_1 + r_2) \cdot (r_3 + r_4) / (r_1 + r_2 + r_3 + r_4) = (10 + 10) \cdot (40 + 20) / (10 + 10 + 40 + 20) = 15 \text{ (Ом).}$$

Определим ток от источника ЭДС через цепь моста (когда r_5 отключен):

$$I_{И} = E / r_M = 6 / 15 = 0,4 \text{ (А).}$$

Пример задачи, используемой на контрольной, при зачете или экзамене

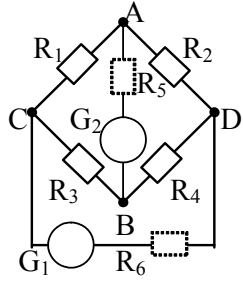


Рис.2.2. Схема моста

Определить параметры цепи мостовой схемы, приведенной на рис. 2.2:

- A) $R_1 = R_4 = 40$; $R_3 = 60$; $R_5 = R_6 = 30$; (Ом); $R_1 = r_X$.
 G_1 = источник ЭДС $E = 5$ В; G_2 = амперметр.
- B) $R_1 = R_4 = 80$; $R_3 = 90$; $R_5 = R_6 = 100$; (Ом); $R_2 = r_X$.
 G_2 = источник ЭДС $E = 14$ В; G_1 = амперметр.
- C) $R_5 = R_2 = 80$; $R_1 = 90$; $R_3 = 5$; $R_6 = 1$; (Ом); $R_3 = r_X$.
 G_1 = источник ЭДС $E = 12$ В; G_2 = амперметр.
- D) $R_5 = R_2 = 80$; $R_1 = 20$; $R_3 = 90$; $R_6 = 100$; (Ом);
 $R_4 = r_X$. $G_2 = E = 16$ В; G_1 = амперметр.

* Направление источника ЭДС можно выбрать индивидуально.

2.2. Расчет параметров цепи методом эквивалентного генератора

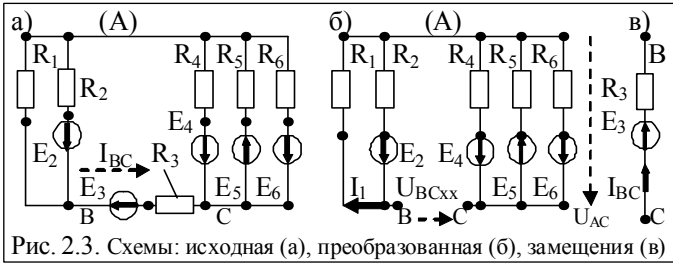


Рис. 2.3. Схемы: исходная (а), преобразованная (б), замещения (в)

Пример 2.2. Для схемы на (рис. 2.3) требуется определить эквивалентные параметры: напряжение холостого хода $U_{BC,XX}$ и ток I между клеммами В-С при включении цепи E_3R_3 .

Дано: $E_2 = E_3 = E_4 = 20$; $E_5 = 15$; $E_6 = 10$ (В); $R_1 = R_2 = R_3 = 2$; $R_4 = 10$; $R_5 = R_6 = 5$ (Ом).

Решение. Определим ток эквивалентной цепи: $I = (U_{BC,XX} \pm E) / (r_2 + r_3)$.

где: r_2 – эквив. сопротивление схемы со стороны зажимов выделенной ветви;
 r_3 – сопротивление ветви, в которой необходимо определить ток;
 знак (+) ставят, если направление ЭДС совпадает с направлением тока.

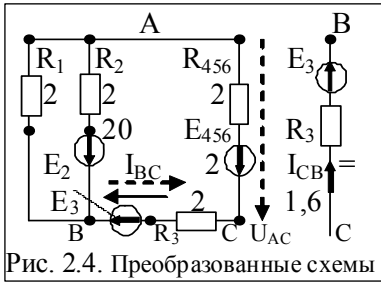


Рис. 2.4. Преобразованные схемы

- 1) $I_1 = E_2 / (r_1 + r_2) = 20 / (2 + 2) = 5$ А (BC разорв.)
- 2) $U_{AC} = [g_4 \cdot E_4 - g_5 \cdot E_5 + g_6 \cdot E_6] / [g_4 + g_5 + g_6] = [20 \cdot 0,1 - 15 \cdot 0,2 + 10 \cdot 0,2] / [0,1 + 0,2 + 0,2] = +1 / 0,5 = +2$ В.
- 3) $U_{XX,BC} = [r_1 \cdot I_1 + U_{AC}] = 2 \cdot 5 + 2 = 12$ (В).
- 4) $r_2 = [(r_1 \cdot r_2) / (r_1 + r_2)] + [1 / (g_4 + g_5 + g_6)] = 3$ Ом.
- 5) $I_4 = (E_4 - U_{AC}) / r_4 = (20 - 2) / 10 = 1,8$ А;
 $I_5 = (E_5 + U_{AC}) / r_5 = (15 + 2) / 5 = 3,4$ А;
 $I_6 = (E_6 - U_{AC}) / r_6 = (10 - 2) / 5 = 1,6$ А.

6) $I_{BC} = (U_{XX,BC} - E_3) / (r_2 + r_3) = (12 - 20) / (3 + 2) = -1,6$ А. [по Кирхг.: $I_1 = 5,8$; $I_2 = 4,2$; $I_3 = 1,6$].

Выводы: истинный ток I_{BC} направлен в противоположную сторону, т.е. от С к В.

2.3. Расчет параметров эквивалентного источника

Для электрической схемы, содержащей несколько источников ЭДС и, или источников тока необходимо определить эквивалентный источник E_{Σ} и его внутреннее сопротивление r_{Σ} . Для определения напряжения E_{Σ} эквивалентного источника находят напряжение U_{XX} в разрыве цепи (кл. m-n). Аналогично, для определения тока эквивалентного источника J_{Σ} находят ток I_{K3} через замкнутые зажимы m-n.

Пример 2.3. Определить параметры эквивалентного источника напряжения, позволяющего оценить ток в сопротивлении R_4 для схемы (рис. 2.5,а).

$E_1 = 2$; $E_2 = 4$; $E_5 = 2$; $E_6 = 1,5$ (В); $J_3 = 3$ А; $R_1 = R_5 = 3$; $R_2 = 9$; $R_3 = 2$; $R_4 = 1,5$; $R_6 = 1,75$ (Ом).

Решение. Сопротивление R_{Σ} эквивалентного источника определяют к какому-либо участку цепи, например, по отношению к клеммам m-n с сопротивлением R_4 .

Необходимо вначале выполнить замену источников тока J на источники напряжения E с внутренним сопротивлением r , например: $E_3 = (J_3 \cdot r_3) = 3 \cdot 2 = 6$ (В).

В результате преобразований схему приводится к реальной, с источниками напряжения с параметрами E_{Σ} , r_{Σ} (рис. 2.5,б - рис. 2.5,в).

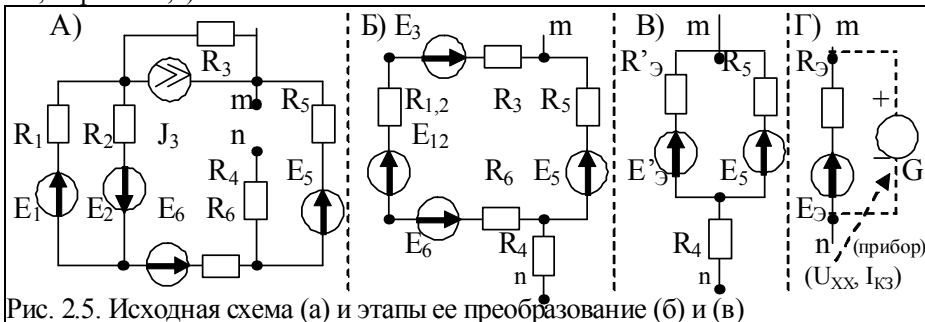


Рис. 2.5. Исходная схема (а) и этапы ее преобразование (б) и (в)

Используя метод эквивалентных преобразований заменяют параллельно включенные источники напряжения E_1, E_2 одним источником с параметрами:

$$E_{12} = (E_1/r_1 \pm E_2/r_2)/(1/r_1 + 1/r_2) = 2,5 \text{ (В)}. \quad r_{12} = r_1 r_2 / (r_1 + r_2) = 2,25 \text{ (Ом)}.$$

Свойство. Знак (+) ставят, если // включенные источники ЭДС направлены в одну сторону. Затем объединяют последовательно включенные источники E_{12} , E_3 , E_6 и находят эквивалентный источник E_3' :

$$E_3' = E_3 - E_{12} - E_6 = (6 - 2,5 - 1,5) = 2 \text{ В}; \quad r_3 = r_3 + r_6 + r_{12} = 2 + 1,75 + 2,25 = 6 \text{ Ом}.$$

Объединяют // соединенные источники E_3' , E_5 и находят эквивалентный источник:

$$E_3 = (E_3'/r_3 + E_5/r_5)/(1/r_3 + 1/r_5) = 2 \text{ (В)}. \quad r_3 = [r_3' r_5 / (r_3' + r_5)] + r_4 = 3 \text{ (Ом)}.$$

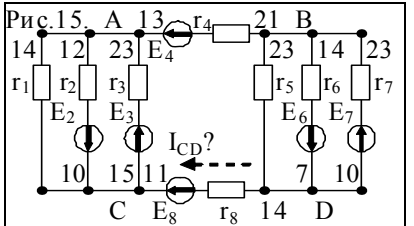
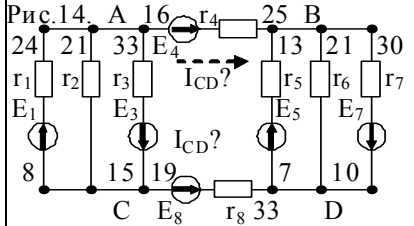
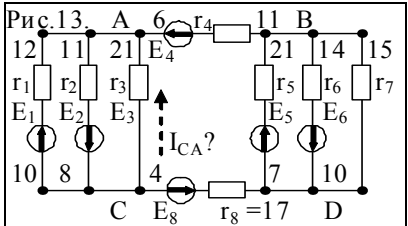
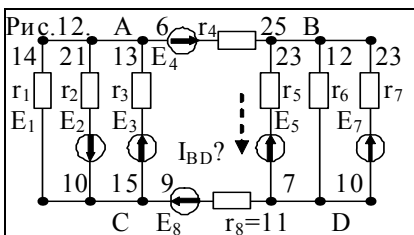
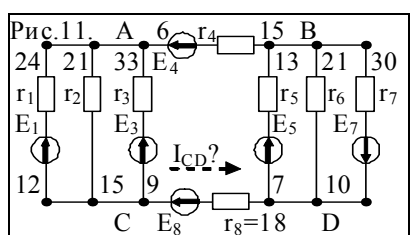
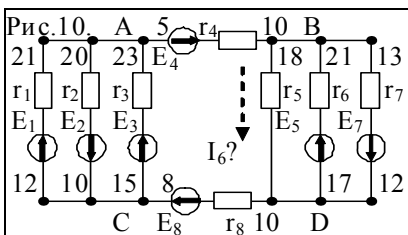
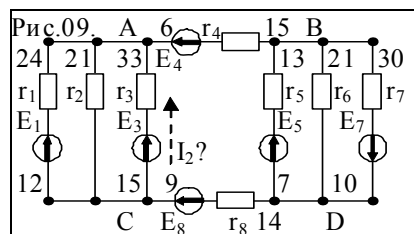
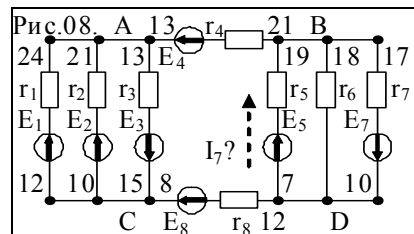
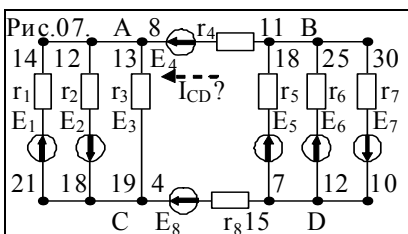
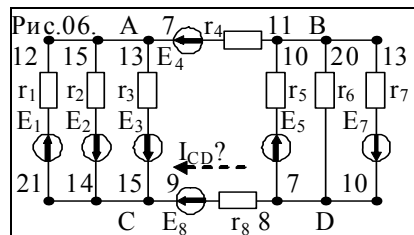
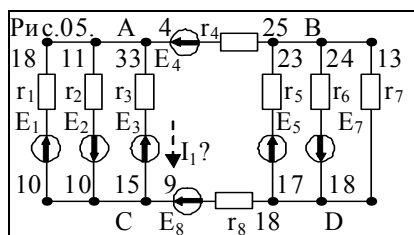
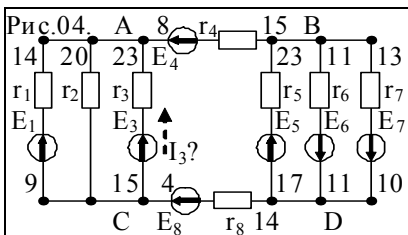
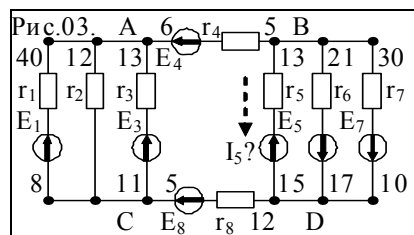
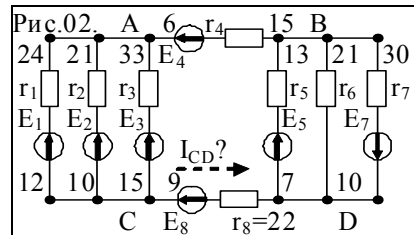
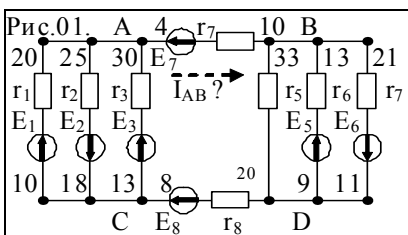
$$I_{MH} = E_3 / r_3 = 2/3 = 0,66 \text{ (А)}.$$

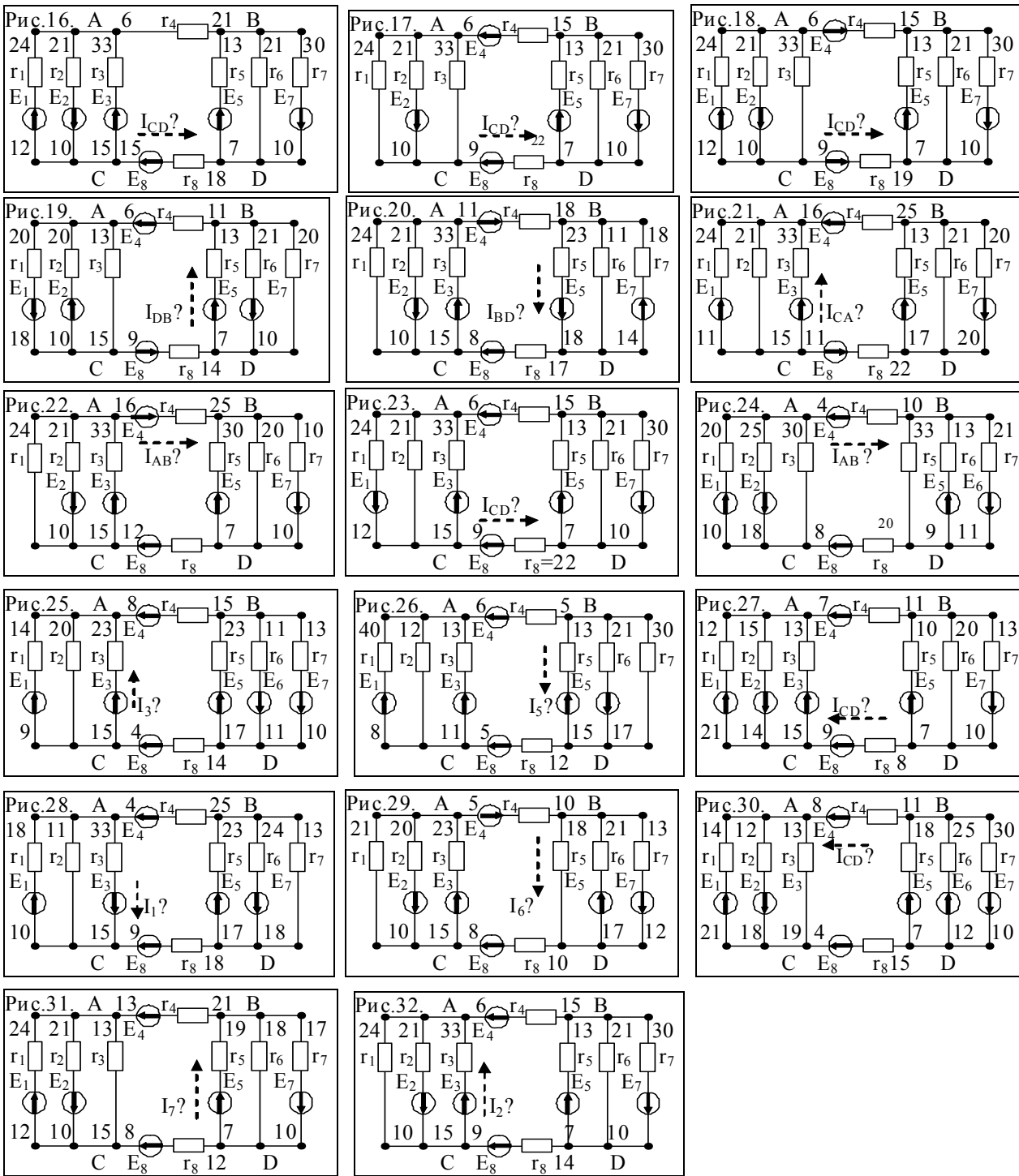
Рекомендуемая литература

1. Рекус Г.Г. Основы электротехники и промышленной электроники в примерах и задачах с решениями: Учебное пособие. – М.: Высш. шк., 2008. – 343 с.
2. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. – М.: Высш. шк., 2003. – 540 с.
3. Сборник задач по электротехнике и основам электроники / Под ред. В.Г. Герасимова. – М.: Высш. шк., 1987. – 288 с.
4. Березкина Т.Ф., Гусев Н.Г. Задачник по общей электротехнике с основами электроники. – М.: Высш. шк., 1983. – 368с.

РГР № 2.1. Задание для самостоятельного решения - для группы №1

1. Определить параметры цепи методом эквивалентного генератора.
2. Номер варианта задания соответствует номеру рисунка.





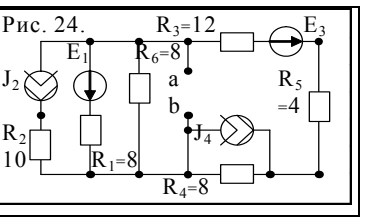
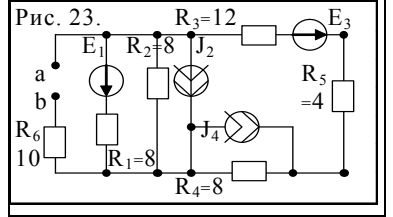
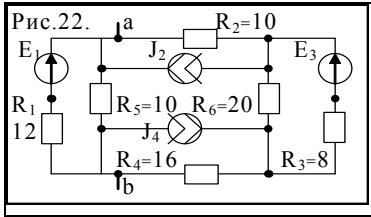
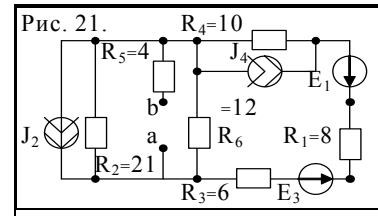
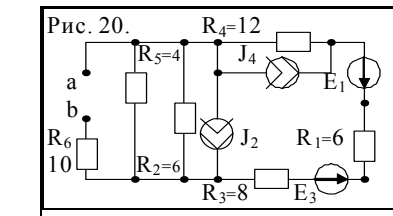
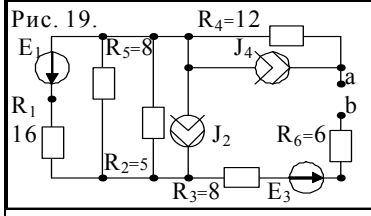
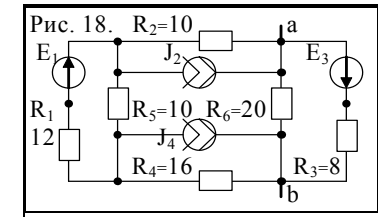
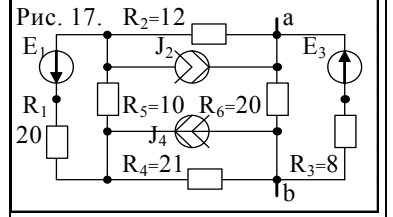
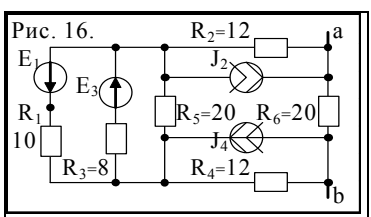
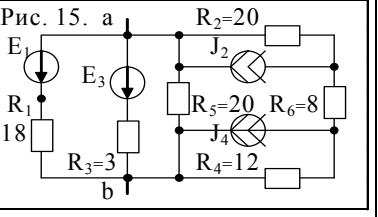
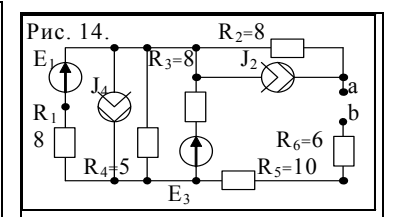
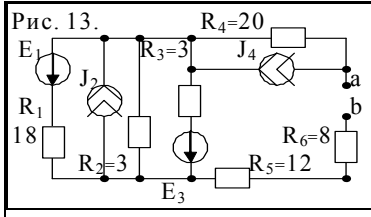
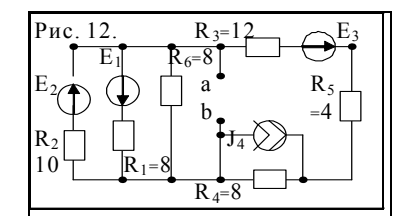
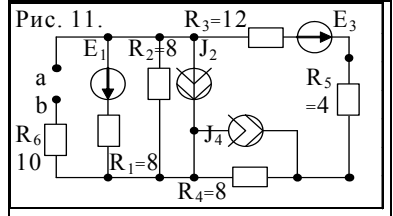
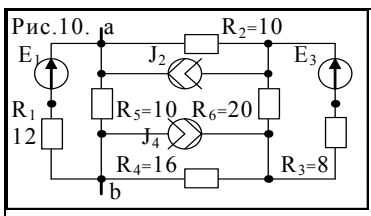
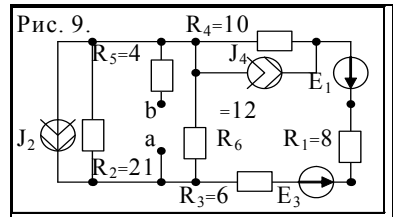
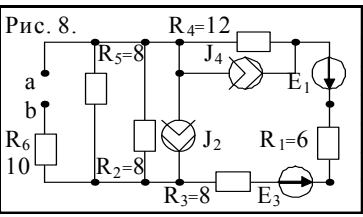
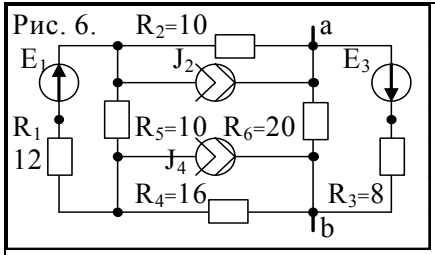
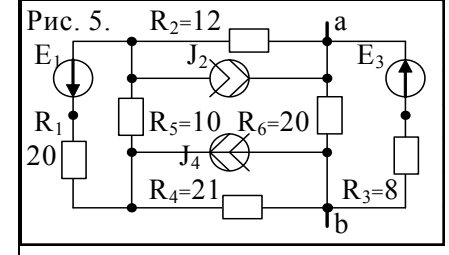
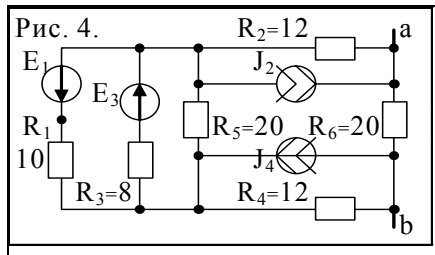
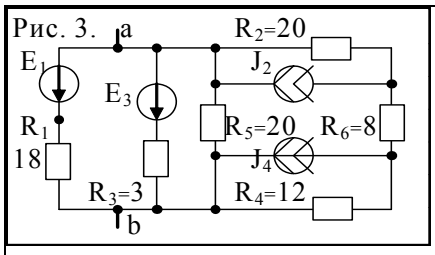
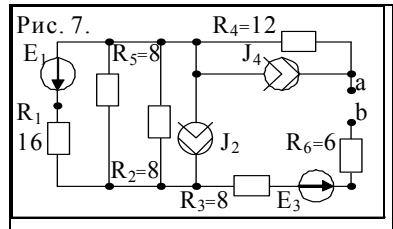
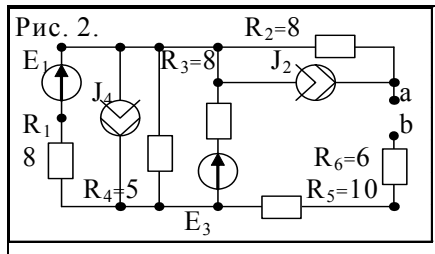
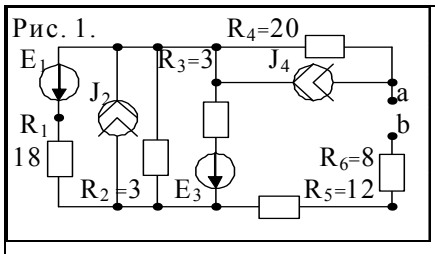
РГР № 2.2. Задание для самостоятельного решения - для группы №2

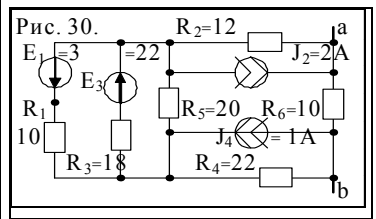
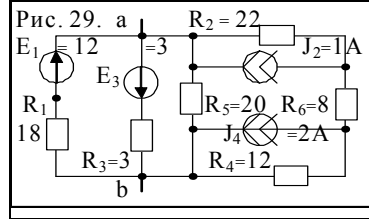
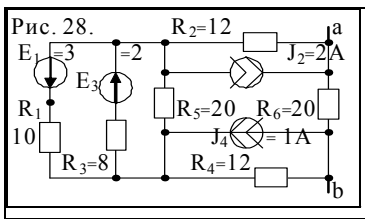
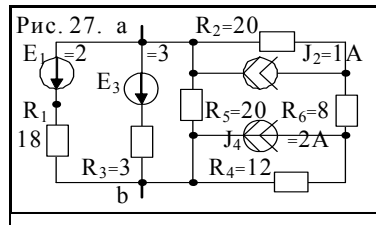
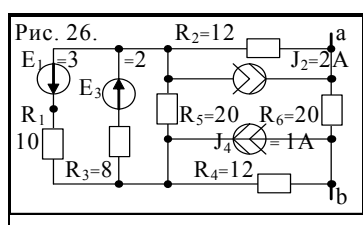
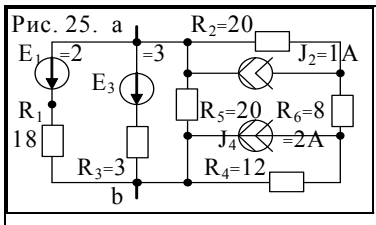
Выполнить расчет параметров схемы методом эквивалентного генератора.

1. Определить параметры E_3 , R_3 и I_3 для эквивалентной упрощенной схемы.
2. Показать последовательность преобразования схемы!
3. Номиналы элементов схемы обозначены на рисунке. № варианта = № рис.!

Вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
E_1	10	15	6	18	12	8	18	16	14	12	10	6	3	6	9
E_3	18	10	12	15	6	10	8	4	12	14	16	18	8	30	4
J_2	1	2	2	4	3	0,5	2	1	2	3	0,5	$E_3=4$	0,5	1	0,5
J_4	0,5	3	2	1	1	4	0,5	2	3	1	4	1	2	1	2

Вар.	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
E_1	4	8	20	7	5	3	9	14	10	2	3	16	11	12	19
E_3	9	6	3	3	10	9	5	7	14	3	2	13	14	23	14
J_2	3	0,5	2	3	4	0,6	2	0,2	2	1	2	1,5	0,8	1,2	0,6
J_4	0,5	3	4	0,8	3	4	0,4	6	5	2	1	0,6	1,2	1,5	0,8





ТЕМА №3

Оценка токов разветвленной цепи с источниками постоянной ЭДС (8)

Цель занятия: приобретение умений и навыков определения токов в разветвленной цепи с несколькими источниками постоянной ЭДС.

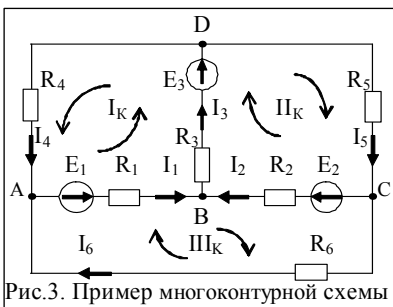


Рис.3. Пример многоконтурной схемы

Пример 1.a. В схеме рис. 3. определить токи в ветвях цепи *узловым методом*.

Для определения параметров электрической схемы данным методом, необходимо:

1) составить уравнения для токов в узлах, используя первый закон Кирхгофа: (кол. уравнений равно кол-ву узлов минус 1):

$$\begin{aligned} \text{Узел А)} \quad I_4 + I_6 - I_1 &= 0; & (1) \\ \text{Узел В)} \quad I_1 + I_2 + I_3 &= 0; & (2) \\ \text{Узел С)} \quad I_5 - I_2 - I_6 &= 0. & (3) \end{aligned}$$

2) составить уравнения для контуров, используя второй закон Кирхгофа: (кол-во уравнений равно кол-ву контуров):

$$\begin{aligned} \text{Контур I:} \quad E_1 + E_3 - I_1 R_1 - I_3 R_3 - I_4 R_4 &= 0; & I_1 R_1 + I_3 R_3 + I_4 R_4 &= E_1 + E_3; & (4) \\ \text{Контур II:} \quad E_2 + E_3 - I_2 R_2 - I_3 R_3 - I_5 R_5 &= 0; & I_2 R_2 + I_3 R_3 + I_5 R_5 &= E_2 + E_3; & (5) \\ \text{Контур III:} \quad E_1 - E_2 - I_1 R_1 + I_2 R_2 - I_6 R_6 &= 0; & I_1 R_1 - I_2 R_2 + I_6 R_6 &= E_1 - E_2. & (6) \end{aligned}$$

Используя матричный метод расчета, определяем искомые токи $I_1 \div I_6$.

Если ток получил знак (-), то направление его вектора необходимо поменять.

Пример 1.b. Определить токи в ветвях схемы *методом контурных токов*.

Для определения параметров схемы методом контурных токов необходимо:

- 1) составить уравнения для контуров, используя только 2-й закон Кирхгофа;
- 2) используя правила, описать контурные и смежные сопротивления и токи:
 - * контурным ЭДС является сумма ЭДС, входящих в данный контур;
 - * контурным сопротивлением будет сумма сопротивлений данного контура;
$$R_{11} = (R_1 + R_3 + R_4); \quad R_{22} = (R_2 + R_3 + R_5); \quad R_{33} = (R_1 + R_2 + R_6).$$

Смежным, является сопротивление, связывающее два соседних контура.

- *) контурным является независимый (самостоятельный) ток данного контура;
- $$[I_{K1} = I_4; \quad I_{K2} = I_5; \quad I_{K3} = I_6].$$

Смежным, является ток, протекающий между двумя соседними контурами:

$$[I_1 = I_{K1} + I_{K3}; \quad I_2 = I_{K2} - I_{K3}; \quad I_3 = I_{K1} + I_{K2}].$$

*(Если направления обходов соседних контуров совпадают, то при описании смежных токов контурные токи суммируют, а если нет, то токи вычитают).

$$\begin{aligned} 1) \quad I_{K1} R_{11} + I_{K2} R_{12} + I_{K3} R_{13} &= E_1 + E_3; & (1) \\ 2) \quad I_{K1} R_{21} + I_{K2} R_{22} - I_{K3} R_{23} &= E_2 + E_3; & (2) \\ 3) \quad I_{K1} R_{31} - I_{K2} R_{32} + I_{K3} R_{33} &= E_1 - E_2; & (3) \end{aligned}$$

В результате решения матрицы можно определить контурные токи $I_{K1} \div I_{K3}$.

Оставшиеся искомые токи определяют как смежные токи.

Для проверки результатов используют уравнение баланса мощностей.

Пример 2. Оценки токов в ветвях цепи несколькими методами:

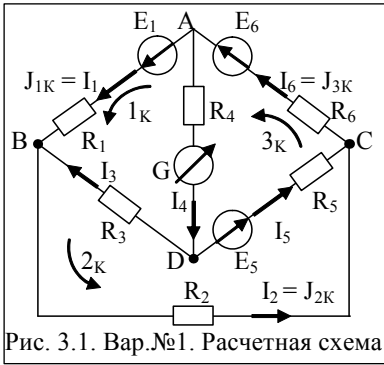


Рис. 3.1. Вар.№1. Расчетная схема

1. Методом контурных токов;
2. Узловым методом;
3. Методом эквивалентного генератора.

$$E_1 = 100V; E_2 = 20V; E_3 = 150V;$$

$$R_1 = 10 \text{ Ом}; R_2 = 4 \text{ Ом}; R_3 = 25 \text{ Ом};$$

$$R_4 = 8 \text{ Ом}; R_5 = 5 \text{ Ом}; R_6 = 10 \text{ Ом}.$$

Определим: I_4 в цепи с прибором G (рис. 3.1).

Решение:

1. Для определения токов (J_1, \dots, J_6) в цепи «методом контурных токов», необходимо использовать только 2-ой закон Кирхгофа.

Для решения необходимо иметь понятия: «контурное напряжение», «контурные и межконтурные сопротивления», «контурные и межконтурные токи».

$$\begin{cases} +(R_1+R_3+R_4) \cdot J_I - R_3 \cdot J_{II} - R_4 \cdot J_{III} = E_I; \\ -R_3 \cdot J_I + (R_2+R_3+R_5) \cdot J_{II} - R_5 \cdot J_{III} = -E_2; \\ -R_4 \cdot J_I - R_5 \cdot J_{II} + (R_4+R_5+R_6) \cdot J_{III} = E_{III}; \end{cases} \begin{cases} 43 \cdot J_I - 25 \cdot J_{II} - 8 \cdot J_{III} = 100; \\ -25 \cdot J_I + 34 \cdot J_{II} - 5 \cdot J_{III} = -20; \\ -8 \cdot J_I - 5 \cdot J_{II} + 23 \cdot J_{III} = 20+50. \end{cases}$$

Вид заполнения матрицы

R_{11}	R_{12}	R_{13}	$= E_I$
R_{21}	R_{22}	R_{23}	$= E_{II}$
R_{31}	R_{32}	R_{33}	$= E_{III}$

С учетом знаков получим:

$+R_{11}$	$-R_3$	$-R_4$	$= E_I$
$-R_3$	$+R_{22}$	$-R_5$	$= -E_2$
$-R_4$	$-R_5$	$+R_{33}$	$= E_3+E_6$

Пример матрицы

Решая матрицу по «Кramerу» или «Сайрусу», получим:

$$J_I = I_1 = 6,513 \text{ A};$$

$$J_{II} = I_2 = 5,146 \text{ A};$$

$$J_{III} = I_6 = 6,427 \text{ A};$$

$$I_3 = J_{II} - J_I = -1,367 \text{ A};$$

$$I_4 = J_{III} - J_I = -0,0857 \text{ A} \quad (\text{искомый ответ});$$

$$I_5 = J_{III} - J_{II} = 1,281 \text{ A};$$

Выводы: В схеме токи J_3 и J_4 имеют отрицательный знак и, следовательно, в схеме необходимо поменять их направление на противоположное.

Проверка: Для проверки результатов используют уравнение баланса мощностей:

$$\sum_{i=1}^M S_{ii} = \sum_{i=1}^{n_n} P_{ii}; \quad E_1 \cdot I_1 + E_3 \cdot I_5 + E_6 \cdot I_6 = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 + I_3^2 \cdot R_3 + I_4^2 \cdot R_4 + I_5^2 \cdot R_5 + I_6^2 \cdot R_6.$$

2. Для определения токов (J_1, \dots, J_6) в цепи «узловым методом», необходимо использовать вначале 1-й закон Кирхгофа, а затем 2-ой закон Кирхгофа.

По 1 зак. Кирх... $\begin{cases} \text{A)} -J_1 - J_4 + J_6 = 0; \\ \text{B)} +J_1 - J_2 + J_3 = 0; \\ \text{C)} +J_2 + J_5 - J_6 = 0; \end{cases}$

По 2 зак. Кирх... $\begin{cases} 1) I_1 \cdot R_1 - I_3 \cdot R_3 - I_4 \cdot R_4 = E_1; \\ 2) I_2 \cdot R_2 + I_3 \cdot R_3 - I_5 \cdot R_5 = -E_2; \\ 3) I_4 \cdot R_4 + I_5 \cdot R_5 + I_6 \cdot R_6 = E_3 + E_6; \end{cases}$

$-I$	0	0	$-I$	0	I	$= 0$
I	$-I$	I	0	0	0	$= 0$
0	I	0	0	I	$-I$	$= 0$
R_1	0	$-R_3$	$-R_4$	0	0	$= E_1$
0	R_2	R_3	0	$-R_5$	0	$= -E_2$
0	0	0	R_4	R_5	R_6	$= E_3 + E_6$

Пример матрицы

Решая матрицу методом «Крамера» или «Сайруса», получим:

$$I_1 = 6,513A; I_2 = 5,146A; I_3 = -1,367A; I_4 = -0,0857A; I_5 = 1,28A; I_6 = 6,43A.$$

Выводы: расчетные токи совпали по величине, следовательно, решение верное.

Пример №3. Рис. 3.2. $E_1 = 100V; E_2 = 50V; E_3 = 20V;$

$$R_1 = 1 \text{ Ом}; R_2 = 2 \text{ Ом}; R_3 = 3 \text{ Ом}; R_4 = 4 \text{ Ом}; R_5 = 5 \text{ Ом}; R_6 = 6 \text{ Ом}.$$

При расчете параметров схемы (рис. 3.3) методом контурных токов, получим:

$$I_1 = J_I = 24,871A; I_2 = J_{II} = 21,333A;$$

$$I_6 = J_{III} = 13,743A; I_3 = J_{II} - J_I = -3,538A;$$

$$I_4 = J_{III} - J_I = -11,128A; I_5 = J_{II} - J_{III} = 7,59A.$$

3. Методом эквивалентного генератора определим I_1 в ветви АВ.

Запишем уравнение для искомого тока:

$$I_1 = (U_{AD.XX} + E_1) / (R_{AB.VH} + R_1).$$

В связи с тем, что ветви «cad», «cbd» и «cd» в схеме (рис. 3.2) соединены параллельно, то для определения напряжения U_{CD} необходимо использовать свойство проводимости в

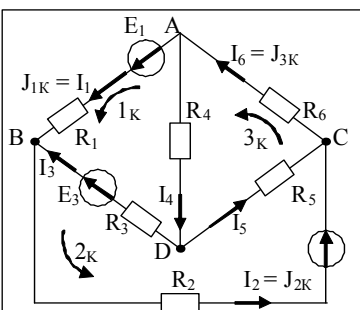


Рис. 3.2. Вар.№1. Расчетная схема

данных ветвях:

$$2) U_{CD} = [(E_2 + E_3) \cdot (g_2 + g_3)] / [(g_2 + g_3) + (g_6 + g_4) + g_5] =$$

$$= [(50 + 20) \cdot (1/(2+3))] / [(1/(2+3) + (1/(4+6) + (1/5))] = 28V;$$

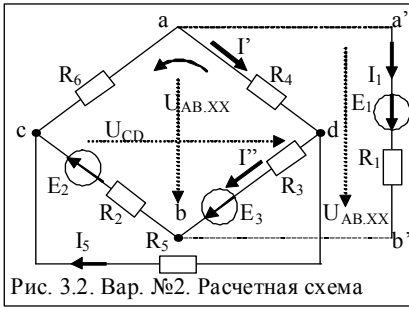


Рис. 3.2. Вар. №2. Расчетная схема

Определим ток J' для контура «dacd»:

$$0 = -J' \cdot (R_4 + R_6) + (U_{CD});$$

$$J' = (U_{CD}) / (R_4 + R_6) = (28) / (4 + 6) = 2,8 \text{ A.}$$

Определим ток J'' для контура «dcbdb»:

$$(E_2 + E_3) = J'' \cdot (R_2 + R_3) + (U_{CD});$$

$$J'' = (-U_{CD} + E_2 + E_3) / (R_2 + R_3) =$$

$$= (-28 + 50 + 20) / (2 + 3) = 8,4 \text{ A.}$$

$$(-E_3) = (-J'' \cdot R_3 - J' \cdot R_4) + (U_{AB,XX});$$

$$(U_{AB,XX}) = (J' \cdot R_4 + J'' \cdot R_3 - E_3) = (2,8 \cdot 4 + 8,4 \cdot 3 - 20) = 16,4 \text{ V.}$$

Определим сопротивление ($R_{AB,ВН}$) цепи:

$$R_{AB,ВН} = R_A + [(R_D + R_3) \cdot (R_C + R_2) / (R_C + R_3 + R_D + R_2)].$$

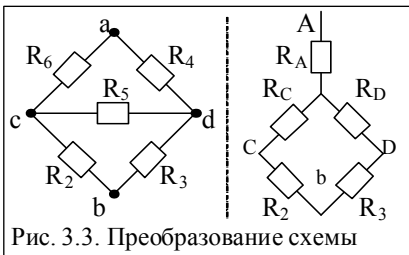


Рис. 3.3. Преобразование схемы

$$R_A = (R_4 \cdot R_6) / (R_4 + R_5 + R_6) =$$

$$= (4 \cdot 6) / (4 + 5 + 6) = 1,6 \text{ (Ом);}$$

$$R_C = (R_5 \cdot R_6) / (R_4 + R_5 + R_6) =$$

$$= (5 \cdot 6) / (4 + 5 + 6) = 2,0 \text{ (Ом);}$$

$$R_D = (R_4 \cdot R_5) / (R_4 + R_5 + R_6) =$$

$$= (4 \cdot 5) / (4 + 5 + 6) = 1,3 \text{ (Ом).}$$

$$R_{AB,ВН} = 1,6 + [(1,3 + 3) \cdot (2 + 2) / (3 + 2 + 2 + 1,3)] = 3,67 \text{ (Ом).}$$

В результате $I_1 = (U_{AB,XX} + E_1) / (R_{AB,ВН} + R_1) = (16,4 + 100) / (3,67 + 1) = 24,83 \text{ A.}$

Пример 4. Расчет параметров цепи с источниками ЭДС и источником тока.

Определим токи в ветвях схемы (рис. 3.4,а) используя законы Кирхгофа.

Параметры элементов схемы: $E_1 = 40 \text{ В}$, $E_2 = 20 \text{ В}$, $E_4 = 10 \text{ В}$, $J_6 = 3 \text{ А}$, $r_1 = 5 \text{ Ом}$.

$r_3 = 5 \text{ Ом}$, $r_4 = 20 \text{ Ом}$, $r_5 = 10 \text{ Ом}$. Рис. 3.4. Исходная (а) и расчетная (б) схемы.

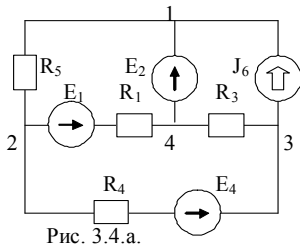


Рис. 3.4.а.

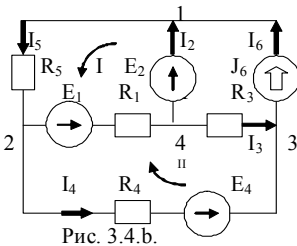


Рис. 3.4.б.

Решение. Цепь образована шестью ветвями ($n_B = 6$).

В ветвях 1, 2, 4 содержатся ист. ЭДС E_1, E_2, E_4 , а ветвь 6 содержит источник тока J_6 .

Рисунок 3.4. Разветвленная цепь с источниками ЭДС и источником тока

3.4,а) и составим уравнение по 1-му закону Кирхгофа для узлов 1, 2, 3:

$$-I_2 + I_5 - I_6 = 0.$$

$$I_1 + I_4 - I_5 = 0.$$

$$-I_3 - I_4 + I_6 = 0.$$

В схеме три независимых контура. По 2-му закону Кирхгофа можно составить 3 уравнения, однако, учитывая, что ток в ветви 6 равен току источника J_6 , достаточно составить уравнения только для 2-х контуров 1 и 2, в которые не входит ветвь с источником тока. Затем выберем направления обхода этих контуров, как показано на рис. 3.6,б, и запишем уравнения Кирхгофа:

$$R_1 I_1 + R_5 I_5 = E_1 + E_2.$$

$$R_1 I_1 + R_3 I_3 - R_4 I_4 = E_1 - E_4 = 0.$$

Полная система уравнений, составленная по закону Кирхгофа, имеет вид:

$$-I_2 + I_5 = J_6.$$

$$I_1 + I_4 - I_5 = 0.$$

$$I_3 - I_4 = J_6.$$

$$R_1 I_1 + R_5 I_5 = E_1 + E_2.$$

$$R_1 I_1 + R_3 I_3 - R_4 I_4 = E_1 - E_4.$$

Эту систему уравнений представим в матричной форме (матричное уравнение):

0	-1	0	0	1	·	I_1	=	J_6
1	0	0	1	-1	·	I_2	=	0
0	0	1	1	0	·	I_3	=	J_6
r_1	0	0	0	r_5	·	I_4	=	$E_1 + E_2$
r_1	0	r_3	$-r_4$	0	·	I_5	=	$E_1 - E_4$

0	-1	0	0	1	·	I_1	=	3
1	0	0	1	-1	·	I_2	=	0
0	0	1	1	0	·	I_3	=	3
5	0	0	0	10	·	I_4	=	60
5	0	5	-20	0	·	I_5	=	30

Решая матричное уравнение, находим определители $\Delta, \Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$, по которым вычислим значения токов: $I_1 = 3,88$; $I_2 = 1,05$; $I_3 = 2,82$; $I_4 = 0,17$; $I_5 = 4,05 \text{ (А)}$.

РГР № 3. Задание для самостоятельного решения

3.1. Определить параметры цепи методом контурных токов - для группы №1

3.2. Определить параметры цепи узловым методом – для группы №2

3.3. Определить ток методом эквивалентного генератора (смотри таблицу)

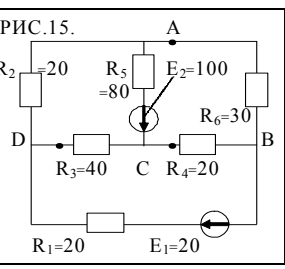
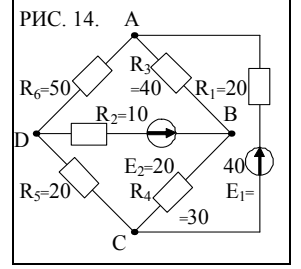
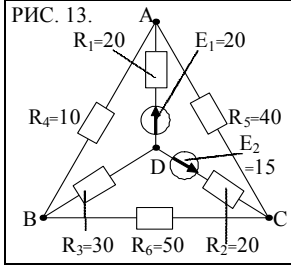
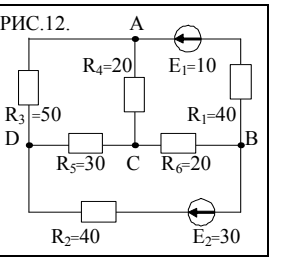
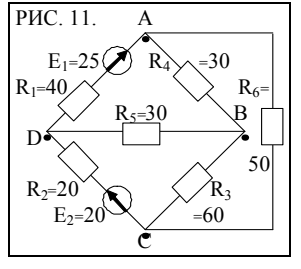
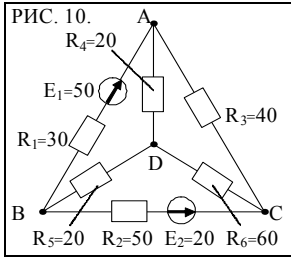
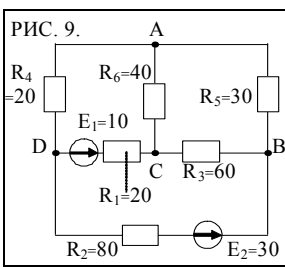
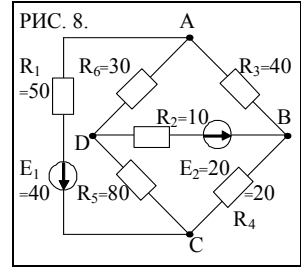
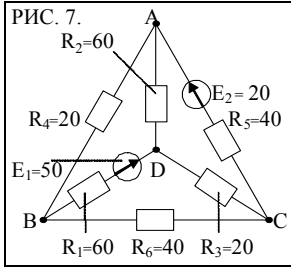
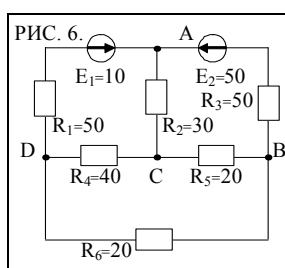
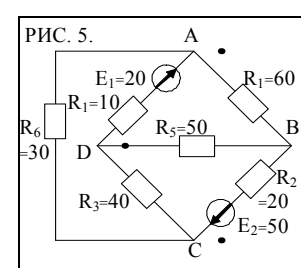
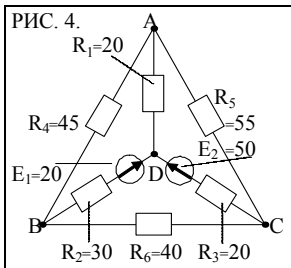
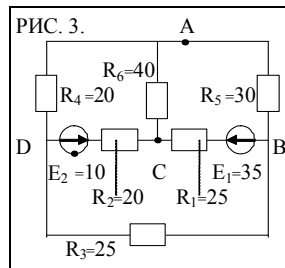
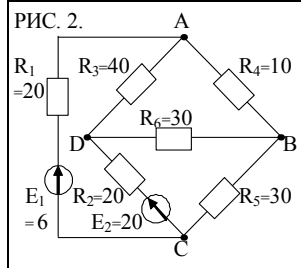
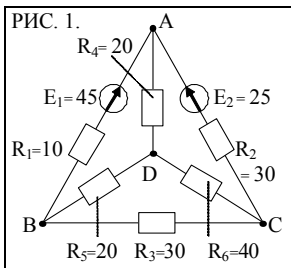
Вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Рис.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Ток	J_1	J_2	J_3	J_3	J_5	J_3	J_1	J_1	J_3	J_4	J_5	J_6	J_1	J_2	J_3
Цепь	А-В	С-Д	Б-Д	Д-С	В-Д	А-С	Б-Д	А-С	С-Б	А-Д	Д-Б	Б-С	А-Д	Б-Д	С-Д

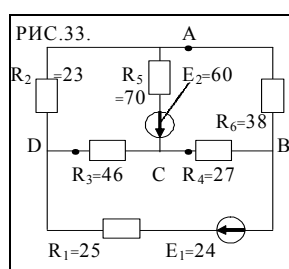
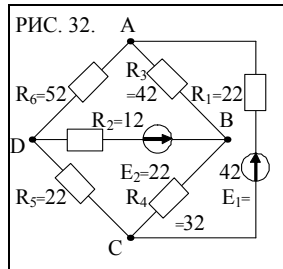
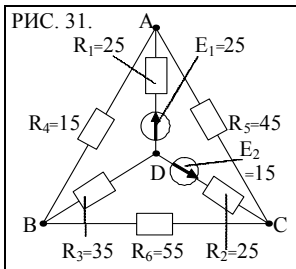
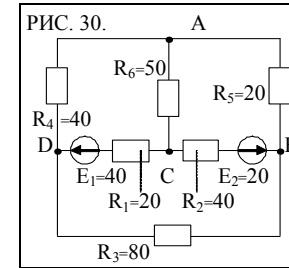
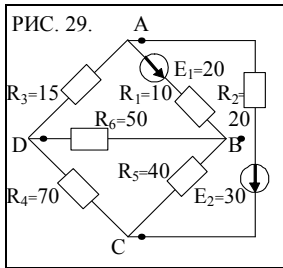
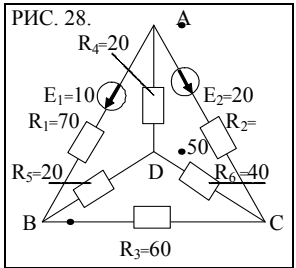
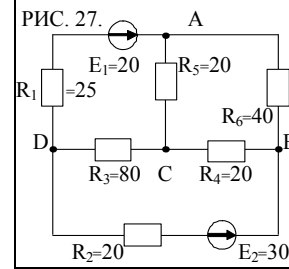
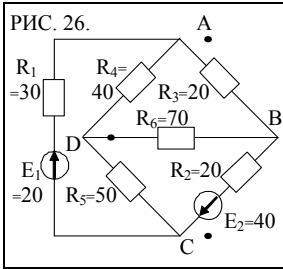
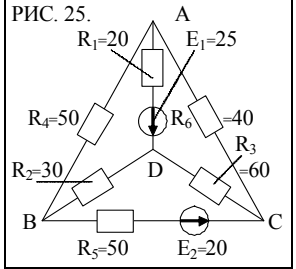
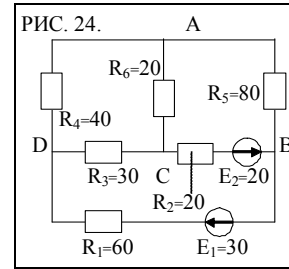
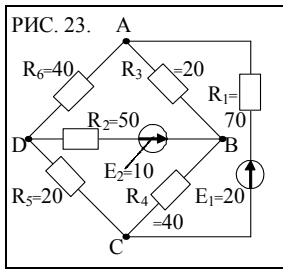
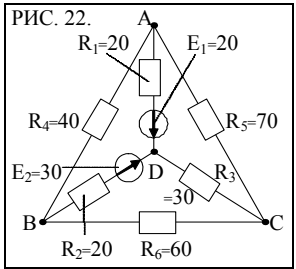
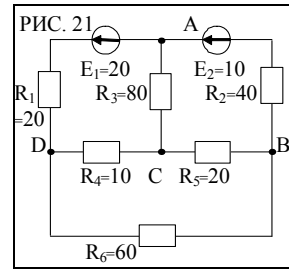
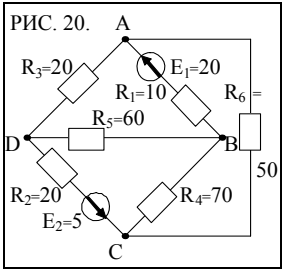
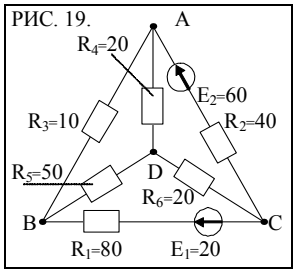
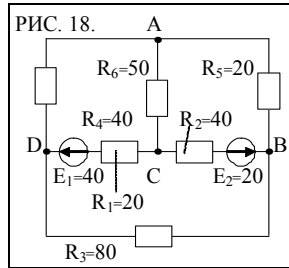
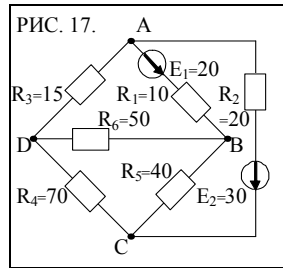
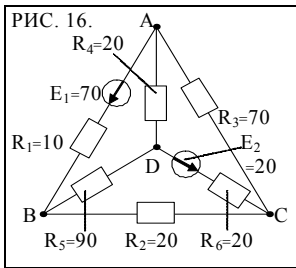
Вар.	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Рис.	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Ток	J_6	J_2	J_5	J_2	J_4	J_3	J_1	J_5	J_1	J_3	J_6	J_6	J_2	J_1	J_3
Цепь	С-Д	А-С	А-В	А-С	С-В	А-С	А-Д	С-Д	Б-Д	С-Д	Б-Д	А-В	А-С	А-Б	Б-Д

Вариант задания соответствует номеру, приведенному на рисунке.

Величины элементов, обозначенные на рисунках схем: (R – Ом; U - В).

Для проверки результатов использовать уравнение баланса мощностей.





Рекомендуемая литература

1. Рекус Г.Г. Основы электротехники и промышленной электроники в примерах и задачах с решениями: Учебное пособие. – М.: Высш. шк., 2008. – 343 с.
2. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. – М.: Высш. шк., 2003. – 540 с.
3. Сборник задач по электротехнике и основам электроники / Под ред. В.Г. Герасимова. – М.: Высш. шк., 1987. – 288 с.
4. Березкина Т.Ф., Гусев Н.Г. Задачник по общей электротехнике с основами электроники. – М.: Высш. шк., 1983. – 368с.

Пример 1. Анализ параметров цепи в комплексной форме

Определим параметры цепи: $e(t)$, $u_R(t)$, $u_C(t)$, $u_L(t)$, $u_{RL}(t)$, $u_{LC}(t)$, $i(t)$, S , P , Q цепи в комплексной форме и построим векторную диаграмму параметров цепи.

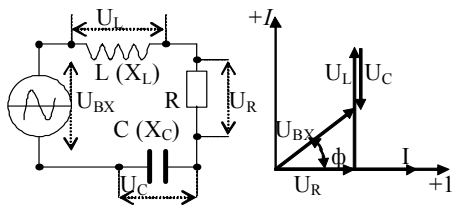


Рис. 4.1,а. Неразветвленная цепь с ист. ЭДС

Дано: $u_{RC(t)} = 56,4 \cdot \sin(400t - 59^\circ)$;
 $R = 8(\text{Ом}); L = 0,025(\text{Гн}); C = 312(\text{мкФ})$.
 Решение: $\cos 59^\circ = 0,515$; $\sin 59^\circ = 0,857$.
 $X_L = j\omega L = 400 \cdot 0,025 = j10 (\text{Ом});$
 $X_C = 1/j\omega C = 10^6/400 \cdot 312 = -j8 (\text{Ом});$
 $Z_{II} = R + jx = 8 + j10 - j8 = (8 + j2)$.

Модуль Z_{II} : $Z_{II} = \sqrt{R^2 + X^2} \cdot e^{j \arctg X/R} = \sqrt{8^2 + 2^2} \cdot e^{j \arctg 2/8} = 8,246 \cdot e^{j14,02^\circ} (\text{Ом})$.

Определим Z_{RC} на участке цепи RC: $Z_{RC} = R + X_C = (8 - j8)$.

Модуль $Z_{RC} = \sqrt{R^2 + (-X_C)^2} \cdot e^{j \arctg(-x/r)} = 11,31 \cdot e^{j \arctg(-1)} = 11,31 \cdot e^{-j45^\circ}$.

$[u_{RC(t)} = U_{mRC} \cdot \sin(\omega t - \psi_U^\circ)]; U_{mRC} = 56,4 \cdot e^{-j59^\circ}; U_{RC} = U_{mRC} / \sqrt{2} = 40 \cdot e^{-j59^\circ}$.

$[\bar{U}_{RC} = 40 \cos -59^\circ + j40 \sin -59^\circ = 40 \cdot 0,515 - j40 \cdot 0,857 = (20,6 - j34,28)]$.

Ток в показательной форме: $I = U_{RC} / Z_{RC} = 40 \cdot e^{-j59^\circ} / 11,31 \cdot e^{-j45^\circ} \approx 3,536 \cdot e^{-j14^\circ}$.

$i(t) = I_m \sin(\omega t - \psi_i) = (1,41 \cdot 3,536) \cdot e^{-j14^\circ} = 5 \cdot e^{-j14^\circ}; i(t) = 5 \cdot \sin(400t - 14^\circ)$.

$U_L = I \cdot Z_L = 3,536 \cdot e^{-j14^\circ} \cdot 10 e^{j90^\circ} = 35,36 e^{j76^\circ} (\text{В})$.

$u_L(t) = (\sqrt{2} \cdot 35,36) \cdot \sin(400t + 76^\circ) = 50 \sin(400t + 76^\circ) (\text{В})$.

$U_C = I \cdot Z_C = 3,536 \cdot e^{-j14^\circ} \cdot 8 \cdot e^{-j90^\circ} = 28,28 \cdot e^{-j104^\circ} (\text{В})$.

$u_C(t) = (\sqrt{2} \cdot 28,28) \cdot \sin(400t - 104^\circ) = 40 \sin(400t - 104^\circ)$.

$U_R = I \cdot Z_R = 3,536 \cdot e^{-j14^\circ} \cdot 8 e^{j0^\circ} = 28,28 e^{-j14^\circ} (\text{В})$.

$u_R(t) = (\sqrt{2} \cdot 28,28) \cdot \sin(400t - 14^\circ) = 40 \sin(400t - 14^\circ) (\text{В})$.

$E = I \cdot Z = 3,536 \cdot e^{-j14^\circ} \cdot 8,246 \cdot e^{j14^\circ} = 29,158 e^{j0^\circ} (\text{В})$.

$e(t) = (\sqrt{2} \cdot 29,158) \cdot \sin(400t \pm 0^\circ) = 41,11 \sin 400t (\text{В})$. [I' – сопряженный ток]

$S = E \cdot I' = 29,158 e^{j0^\circ} \cdot 3,536 e^{+j14^\circ} \approx 103 \cdot e^{+j14^\circ}$. где: $P = 100(\text{Вт}); Q = +j24,8 (\text{ВАР})$.

$P = S \cdot \cos \phi = 103 \cdot 0,97 = 100; Q = S \cdot \sin \phi = 24,8$.

Построение векторной диаграммы (рис. 4.2,б).

Проверка правильности расчета:

1) Существует справедливость выражений:

1) $8/2 = R/X = P/Q = (100/j25) = 4/1$.

2) $\underline{S} = P + Q = \bar{I}' \cdot (\bar{U}_R + \bar{U}_L + \bar{U}_C) \approx (100 + j25);$

3) $\bar{E} = (\bar{U}_R + \bar{U}_L + \bar{U}_C) = (27,44 - j6,84) + (8,55 + j34,3) + (-6,84 - j27,44) \approx (29,15);$

Пример 2. Анализ параметров цепи в комплексной форме

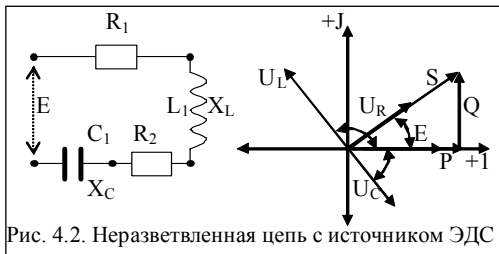


Рис. 4.2. Неразветвленная цепь с источником ЭДС

Для схемы известны параметры:

$R_1 = 6 \text{ Ом}, R_2 = 2 \text{ Ом}, L = 0,02 \text{ Гн},$
 $C = 500 \text{ мкФ}, e(t) = 70,5 \sin 500t$.

Определить следующие параметры:

$Z_{II}, I, U_R, U_C, U_L, P, Q, S, \cos \phi$

и построить векторную диаграмму для электрических параметров цепи.

Решение. 1. Определим сопротивления элементов цепи: X_L, X_C, Z_{II} .

$X_L = j\omega \cdot L = j \cdot 500 \cdot 0,02 \text{ Гн} = j10 (\text{Ом});$

$X_C = 1/(j\omega \cdot C) = 1/[j \cdot 500 \cdot 0,000500 (\text{Ф})] = 4/j = (-j) \cdot 4/[(-j) \cdot j] = -j4 (\text{Ом});$

$Z_{II} = (R_1 + R_2) + (X_L + X_C) = (6 + 2 + j10 - j4) = (8 + j6)$.

2. Ток в цепи: $\bar{I} = \bar{E} / Z_{II} = (E_m / \sqrt{2}) / (8 + j6) = (70,5 / \sqrt{2}) / (8 + j6)$ (алгебраич. форма зап.).

$\bar{I} = (50 \cdot (8 - j6)) / [(8 + j6) \cdot (8 - j6)] = (400 - j300) / (64 + j48 - j48 + 36) = (4 - j3)$.

Модуль тока: $I = \sqrt{4^2 + (-3)^2} \cdot \exp^{j \arctg (-3/4)} = 5 \cdot e^{-j \arctg (0,75)}; I = 5 \cdot e^{-j36,87^\circ}$.

$\bar{U}_R = \bar{I} \cdot (R_1 + R_2) = (4 - j3) \cdot (6 + 2) = (32 - j24)$ (алгебр. форма записи).

Модуль U_R $= \sqrt{32^2 + (-24)^2} \cdot e^{j \arctg (-24/32)} = 40 \cdot e^{-j \arctg (0,75)} = 40 \cdot e^{-j36,87^\circ}$ (экспонен. форма).

$$\bar{U}_L = \bar{I} \cdot X_L = (4-j3) \cdot j10 = (30 + j40). \quad (\text{алгебраическая форма записи}).$$

$$\text{Модуль } U_L = \sqrt{(30^2 + 40^2)} \cdot e^{j \arctg(40/30) + \psi_{UL}} = 50 \cdot e^{j \arctg(1,33) + 90^\circ} = 50 \cdot e^{j(53^\circ + 90^\circ)}.$$

$$\bar{U}_C = \bar{I} \cdot X_C = (4-j3) \cdot (-j4) = (-12 - j16). \quad [\text{использ. прав. Эйлера: } (-j) \cdot (-j) = -1].$$

$$\text{Модуль } U_C = \sqrt{(-12)^2 + (-16)^2} \cdot e^{j \arctg(-16/-12) - \psi_{UC}} = 20 \cdot e^{j \arctg(1,33) - \psi_{UC}} = 20 \cdot e^{j(53^\circ - 90^\circ)}.$$

$$\underline{S} = \bar{E} \cdot \bar{I}' = 50 \cdot (4+j3)' \approx 200 + j150. \quad \text{где: } P = 200(\text{Вт}); \quad Q = +j150(\text{ВАр}).$$

$$\text{Модуль } S = \sqrt{200^2 + 150^2} \cdot e^{j \arctg(150/200)} = 250 \cdot e^{j \arctg(0,75)} = 250 \cdot e^{j(36^\circ 50')}(\text{ВА}).$$

Проверка:

Существует справедливость следующих выражений:

$$1) (8/j6) = R/X = P/Q = (200/j150) = 4/j3.$$

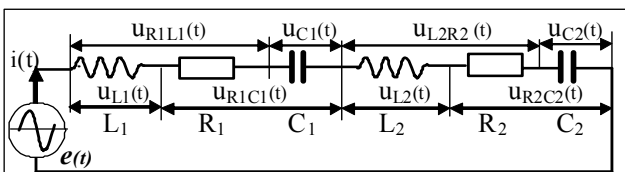
$$2) \underline{S} = \bar{I}'(\bar{U}_L + \bar{U}_C + \bar{U}_R) = (4+j3)' \cdot (30+j40 - 12-j16 + 32-j24) = (4+j3)' \cdot (50) = (200+j150).$$

$$3) \bar{E} = (\bar{U}_R + \bar{U}_L + \bar{U}_C) = (30+j40 - 12-j16 + 32-j24) = 50.$$

Рекомендуемая литература

1. Рекус Г.Г. Основы электротехники и промышленной электроники в примерах и задачах с решениями: Учебное пособие. – М.: Высш. шк., 2008. – 343 с.
2. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. – М.: Высш. шк., 2003. – 540 с.
3. Сборник задач по электротехнике и основам электроники / Под ред. В.Г. Герасимова. – М.: Высш. шк., 1987. – 288 с.
4. Березкина Т.Ф., Гусев Н.Г. Задачник по общей электротехнике с основами электроники. – М.: Высш. шк., 1983. – 368с.

РГР № 4.1. Задание для самостоятельного решения - для группы №1



Для схемы (рис. 4.3) определить следующие параметры: $e(t)$, $i(t)$, $u_{R1,2}(t)$, $u_{L1,2}(t)$, $u_{C1,2}(t)$, S , Q , P , $\cos\varphi$ и построить их векторные диаграммы.

Таблица 4.1. Варианты заданий для РГР № 4.1.

Рис. 4.3. Пример схемы «неразветвленная цепь»

Заданные значения параметров элементов схемы

№	R_1	R_2	L_1 Гн	L_2 Гн	C_1 мкФ	C_2 мкФ	$Z_{L1}; Z_{L2}$ (Ом)	Напряжение или ток	
1	10	10	0,04	0,04	2000	2000	$20-j2$	$20,1e^{-j50,42^\circ}$	$e(t) = 20\sin 100t$
2	14	14	0,03	0,03	800	800			$i(t) = 3,3\sin(100t+25^\circ 48')$
3	16	16	0,04	0,04	1250	1250			$u_{R1}(t) = 16,69\sin(100t)$
4	12	12	0,02	0,02	800	800			$u_{L1}(t) = 14,2\sin(200t+76^\circ 6')$
5	9	9	0,01	0,01	400	400			$u_{C1}(t) = 41,60\sin(500t-53^\circ 6')$
6	5	5	0,014	0,014	-	1000			$u_{R1L1}(t) = 15\sin 200t$
7	4	4	0,03	-	2500	2500			$u_{R1C1}(t) = 27\sin(200t-45^\circ 30')$
8	8	8	0,05	0,05	1250	-			$u_{L1C1}(t) = 80\sin(100t+53^\circ 6')$
9	25	25	0,014	0,014	1000	1000			$e(t) = 30\sin 500t$
10	8	8	0,005	0,005	625	625			$i(t) = 2,9\sin(400t+14^\circ 30')$
11	16	16	0,04	0,04	1250	1250			$u_{R2}(t) = 16,69\sin(200t+36^\circ 54')$
12	15	15	0,01	0,01	500	500			$u_{C2}(t) = 31,4\sin(400t-78^\circ 24')$
13	14	14	0,075	0,075	625	625			$u_{L2}(t) = 10,9\sin(400t+104^\circ 30')$
14	15	15	0,01	0,01	500	500			$u_{R2L2}(t) = 31,4\sin(400t+38^\circ)$
15	15	15	0,01	0,01	500	500			$u_{R2C2}(t) = 31,4\sin(400t-38^\circ)$
16	15	15	0,01	0,01	500	500			$u_{L2C2}(t) = 31,4\sin(400t-58^\circ 24')$
17	26	26	0,03	0,03	2500	2500			$e(t) = 40\sin 200t$
18	18	18	0,04	0,04	2000	2000			$i(t) = 2,15\sin(100t+6^\circ 54')$
19	22	-	0,04	0,04	5000	5000			$u_{R1}(t) = 7,08\sin(100t+45^\circ)$
20	10	10	0,02	-	2500	2500			$u_{L1}(t) = 17\sin(200t+53^\circ 12')$
21	30	30	0,01	0,01	250	-			$u_{C1}(t) = 113\sin(500t-44^\circ 30')$
22	15	-	0,01	-	500	500			$u_{R1L1}(t) = 31,4\sin(400t+78^\circ 24')$
23	15	-	0,01	0,01	500	-			$u_{R1C1}(t) = 31,4\sin(400t-78^\circ 24')$
24	15	15	0,01	-	500	-			$u_{L1C1}(t) = 31,4\sin(400t-28^\circ 24')$
25	26	26	0,03	0,03	2500	2500			$e(t) = 50 \sin 1000t$
26	28	28	0,04	0,04	2000	2000			$i(t) = 2,233\sin(100t + 7^\circ)$
27	-	12	0,04	0,04	5000	5000			$u_{R2}(t) = 10\sin(200t+45^\circ)$
28	30	30	-	0,03	2500	2500			$u_{L2}(t) = 31,20\sin(200t+53^\circ)$
29	33	33	0,01	0,01	-	250			$u_{C2}(t) = 113,1\sin(500t-45^\circ)$
30	-	15	0,2	0,01	500	500			$u_{R2L2}(t) = 31,4\sin(400t+78^\circ 24')$
31	-	33	0,01	0,01	-	250			$u_{R2C2}(t) = 113,1\sin(500t-45^\circ)$
32	18	15	-	0,01	200	500			$u_{L2C2}(t) = 31,4 \sin(400t-18^\circ 24')$

* Значения тригонометрических функций приведены в Приложении, таблица П1.

РГР №4.2. Задание для самостоятельного решения - для группы №2

Варианты 01-36. Цепь переменного тока содержит элементы R, L, C , включенные последовательно. Схема цепи приведена на рисунках №1...№12.

№ рисунка и значения сопротивлений элементов R, L, C , а также один дополнительный параметр заданы в табл. 4.2.

Начертить схему цепи и векторную диаграмму и определить величины:

$Z; E; U_R; U_L; U_C; I; P, Q \text{ и } S$ с учетом их угла фазового сдвига φ .

Рисунки схем для контрольно-графической работы – РГР № 4.2

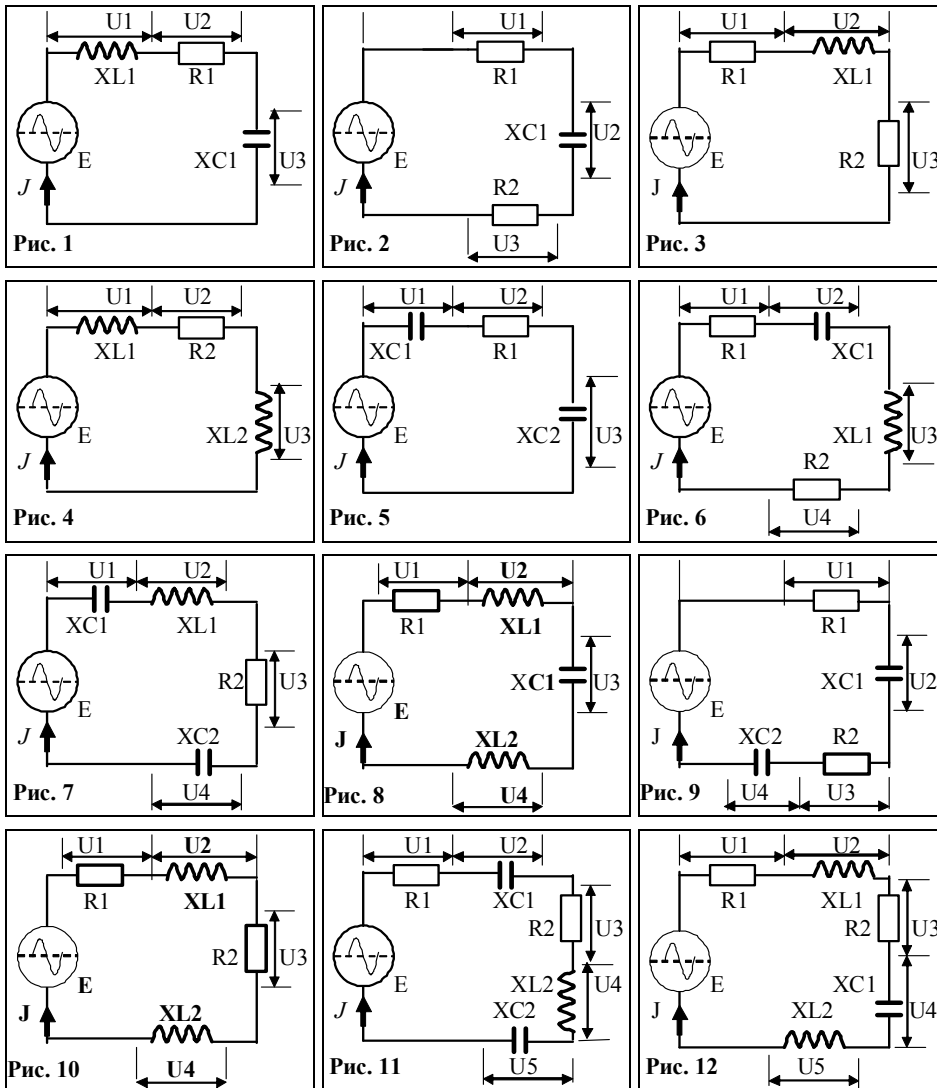


Таблица 4.2. Значения параметров элементов цепи для рисунков 1–12

№ вар	№ рис	R_1 Ом	R_2 Ом	X_{L1} Ом	X_{L2} Ом	X_{C1} Ом	X_{C2} Ом	$Z_{ц}$ Ом Алгебр.	$Z_{ц}$ Ом (exp)	Дополнительн. параметр
01	01	4	-	5	-	3	-	$04,0-j17,0$	$17,46e^{-j60,45^\circ}$	$Q_{L1} = 15,0 \text{ ВА}_P$
02	02	6	2	-	-	9	-			$E = 40 \text{ В}$
03	03	10	6	18	-	12	-			$I = 5 \text{ А}$
04	04	6	-	6	10	-	4			$P_1 = 15,0 \text{ Вт}$
05	05	4	-	-	-	3	3			$S = 36,0 \text{ В*А}$
06	06	3	7	20	-	12	-			$U_{L1} = 40 \text{ В}$
07	07	8	-	12	-	4	2			$P_2 = 20 \text{ Вт}$
08	08	16	-	10	8	6	-			$U_{L2} = 8 \text{ В}$
09	09	10	6	-	-	8	4			$I = 2 \text{ А}$
10	10	2	2	5	6	-	-			$Q_0 = -22 \text{ ВА}_P$
11	11	3	7	7	-	6	4			$E = 50 \text{ В}$
12	12	4	4	4	8	10	-			$I = 4 \text{ А}$
13	01	4	2	-	12	8	-			$U_{R2} = 40 \text{ В}$
14	02	8	4	16	-	10	-			$S = 120 \text{ В*А}$
15	03	6	10	8	4	-	-			$P_0 = 40 \text{ Вт}$
16	04	6	2	-	16	5	3			$U_{R1} = 16 \text{ В}$
17	05	12	-	4	-	12	8			$I = 4 \text{ А}$
18	06	6	-	8	4	4	-			$Q_C = -54 \text{ ВА}_P$
19	07	8	4	-	8	6	10			$S = 180 \text{ В*А}$
20	08	8	8	12	-	4	2			$P_0 = 100 \text{ Вт}$
21	09	6	4	10	-	2	6			$I = 5 \text{ А}$

22	10	4	2	12	-	4	-			$P_1 = 24 \text{ Вт}$		
23	11	5	3	12	-	6	-			$S = 250 \text{ В*А}$		
24	12	3	1	3	5	-	-			$Q_{L1} = 80 \text{ ВА}_P$		
25	01	4	8	10	6	8	-			$Q_L = 64 \text{ ВА}_P$		
26	02	8	2	-	10	4	2			$E = 40 \text{ В}$		
27	03	6	4	12	-	2	2			$U_{L1} = 60 \text{ В}$		
28	04	4	-	8	4	9	-			$Q_0 = 75 \text{ ВА}_P$		
29	05	2	6	8	-	4	2			$U_{R2} = 24 \text{ В}$		
30	06	4	2	4	-	8	4			$Q_C = -36 \text{ ВА}_P$		
31	07	8	-	4	6	10	-			$P_2 = 80 \text{ Вт}$		
32	08	3	3	2	-	10	-			$Q_{C1} = -160 \text{ ВА}_P$		
33	09	2	2	-	9	3	6			$P_0 = 100 \text{ Вт}$		
34	10											
35	11											
36	12											

Примечание. Решение типовых примеров приведено в РГР № 4 и №5.

Рекомендуемая литература

1. Рекус Г.Г. Основы электротехники и промышленной электроники в примерах и задачах с решениями: Учебное пособие. – М.: Высш. шк., 2008. – 343 с.
2. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. – М.: Высш. шк., 2003. – 540 с.
3. Сборник задач по электротехнике и основам электроники / Под ред. В.Г. Герасимова. – М.: Высш. шк., 1987. – 288 с.

ТЕМА № 5

Разветвленные цепи с источником синусоидальной ЭДС (6)

Цель занятия: приобретение умений и навыков анализа и оценки параметров разветвленной цепи с источником ЭДС синусоидального тока.

Пример 1. Выполним расчет параметров разветвленной цепи (рис. 5.1).

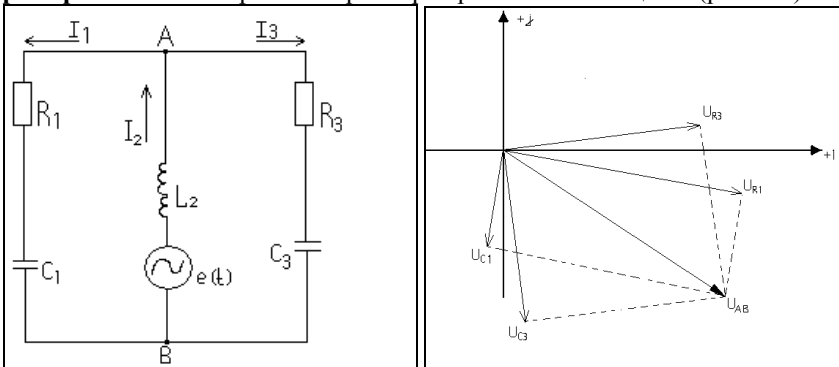


Рис. 5.1,а. Расчетная схема.

5.1,б. – векторная диаграмма U.

Дано: $i_{2(0)} = 5,64 \sin 400t$; $R_1 = 9 \text{ (Ом)}$; $R_2 = 0 \text{ (Ом)}$; $R_3 = 4 \text{ (Ом)}$;
 $L_1 = L_3 = 0$; $L_2 = 0,005 \text{ (Гн)}$; $C_1 = C_3 = 625 \cdot 10^{-6} \text{ (Ф)}$; $C_2 = 0$.

Решение: $X_{L2} = \omega L_2 = 400 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = (j2)$; $X_{C1} = X_{C3} = 1/\omega C_3 = 10^6/(400 \cdot 625) = (-j4)$;

$Z_1 = R_1 + X_{C1} = (9 - j4)$; $Z_1 = 9,85 \cdot e^{-j24^\circ}$; $Z_2 = jX_{L2} = j2$; $Z_3 = R_3 + X_{C3} = (4 - j4)$; $Z_3 = 5,65 \cdot e^{-j45^\circ}$.

$$Z_{1,3} = \frac{Z_1 \cdot Z_3}{Z_1 + Z_3} = \frac{(9 - j4)(4 - j4)}{9 - j4 + 4 - j4} = \frac{(20 - 52j)(13 + 8j)}{(13^2 + j8^2)} = \frac{676 - 516j}{233} = (2,9 - j2,22) = 3,65 e^{-j37,4^\circ}$$

$$Z_{II} = Z_2 + Z_{1,3} = j2 + (2,9 - j2,22) = (2,9 - j0,22); \quad Z_{II} = 2,908 \cdot e^{-j4,33^\circ}$$

$$\bar{I}_L = \bar{I}_2 = 5,64/\sqrt{2} = 4 \text{ А}; \quad I = 4 \cdot e^{j0^\circ}; \quad \bar{U}_L = \bar{U}_2 = \bar{I}_L \cdot Z_2 = 4 \cdot j2 = j8; \quad U_L = 8 \cdot e^{j90^\circ}$$

$$\bar{E} = \bar{I}_2 \cdot Z_{II} = 4 \cdot (2,9 - j0,22) = (11,6 - j0,88); \quad E = 11,63 \cdot e^{-j4,33^\circ}$$

$$\bar{U}_{AB} = \bar{U}_1 = \bar{U}_3 = \bar{E} - \bar{U}_L = (11,6 - j0,88) - j8 = (11,6 - j8,88); \quad U_{AB} = 14,6 \cdot e^{-j37,43^\circ}$$

$$\bar{I}_1 = \bar{U}_{AB}/Z_1 = (11,6 - j8,88) \cdot (9 + j4)/[(9 - j4) \cdot (9 + j4)] = (1,442 - j0,345)$$

$$I_1 = 1,48 \text{ А}; \quad \Psi_{II} = \arctg(-0,345/1,442) = -13^\circ 27'; \quad I_1 = 1,48 \cdot e^{-j13,27^\circ}$$

$$i_{1(0)} = 2,82 \sin(400t - 13^\circ);$$

$$\bar{I}_3 = \bar{U}_{AB}/Z_3 = (11,6 - j8,88) \cdot (4 + j4)/[(4 - j4) \cdot (4 + j4)] = (2,54 + j0,345);$$

$$I_3 = 2,58 \text{ А}; \quad \Psi_{I3} = \arctg(0,34/2,54) = 7^\circ 37'; \quad I_3 = 2,58 \cdot e^{j7,37^\circ}$$

$$i_{3(0)} = 3,63 \sin(400t + 7^\circ 37'); \quad S = E \cdot \bar{I}_2 = 11,63 \cdot e^{-j4,33^\circ} \cdot 4 e^{j0^\circ} = 46,52 \cdot e^{-j4,33^\circ}$$

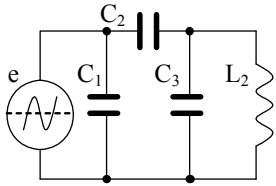
$$\begin{aligned} \dot{S} &= \bar{I}_2 \cdot \bar{U}_2 + \bar{I}_1 \cdot \bar{U}_{AB} + \bar{I}_3 \cdot \bar{U}_{AB} = (4 \cdot j8) + [(1,442 - j0,345) \cdot (11,6 - j8,88)] + \\ &+ [(2,54 + j0,345) \cdot (11,6 - j8,88)] = 46,38 - j3,51; \quad \text{где: } P = 46,38 \text{ (Вт)}; Q = -j3,51 \text{ (ВАР)}. \end{aligned}$$

$$S = \sqrt{46,38^2 + 3,51^2} \cdot e^{j \arctg(-3,51/46,38)} = 46,52 \cdot e^{-j4,33^\circ} \text{ (ВА)}. \quad (\bar{I} - \text{сопряженный ток}).$$

*) Проверка справедливости отношений: $(2,9 - j0,22) = R/X = P/Q = (46,38/-j3,51) \approx 13,2$.

Пример 2. Выполним расчета параметров резонансной схемы (рис. 5.2)

Для схемы (рис. 5.2) требуется определить резонансные частоты и построить график частотной характеристики входного сопротивления (или входной проводимости).



Дано:
 $L_0 = 0,001$ Гн; $L_3 = 0,006$ Гн; $L_3/L_0 = 6$;
 $C_0 = 2$ мкФ; $C_1 = 120$ мкФ; $C_1/C_0 = 60$;
 $C_2/C_0 = 30$, $C_2 = 60$ мкФ;
 $C_3/C_0 = 60$, $C_3 = 120$ мкФ.

Решение: Условие резонанса со смешанным соединением нескольких индуктивных и емкостных элементов заключается в равенстве нулю мнимой части входного сопротивления.

Найдем выражение входного сопротивления цепи:
 Конденсатор C_3 и катушка L_3 соединены параллельно.
 Проводимость этой части цепи равна:

$$Y_3 = \frac{1}{j\omega L_3} + j\omega C_3 = \frac{1 - \omega^2 L_3 C_3}{j\omega L_3} \text{ (Сим).}$$

Сопротивления этой части цепи равно:

$$Z_3 = \frac{1}{Y_3} = \frac{j\omega L_3}{1 - \omega^2 L_3 C_3} \text{ (Ом).}$$

Конденсатор C_2 соединен последовательно с частью цепи, сопротивление которой равно Z_3 .

Сопротивления этой части цепи равно:

$$Z_{2,3} = \frac{1}{j\omega C_2} + \frac{j\omega L_3}{1 - \omega^2 L_3 C_3} = \frac{1 - \omega^2 L_3 C_3 - \omega^2 L_3 C_2}{j\omega C_2 (1 - \omega^2 L_3 C_3)} \text{ (Ом).}$$

Проводимость этой части цепи равно:

$$Y_{2,3} = \frac{j\omega C_2 (1 - \omega^2 L_3 C_3)}{1 - \omega^2 L_3 C_3 - \omega^2 L_3 C_2} \text{ (Сим).}$$

Входная проводимость цепи равна:

$$Y_{\text{вх}} = j\omega C_1 + \frac{j\omega C_2 (1 - \omega^2 L_3 C_3)}{1 - \omega^2 L_3 C_3 - \omega^2 L_3 C_2} = \frac{j\omega C_1 (1 - \omega^2 L_3 C_3 - \omega^2 L_3 C_2) + j\omega C_2 (1 - \omega^2 L_3 C_3)}{1 - \omega^2 L_3 (C_3 + C_2)} =$$

$$= \frac{j\omega (C_1 - \omega^2 L_3 C_3 C_1 - \omega^2 L_3 C_2 C_1 + C_2 - \omega^2 L_3 C_3 C_2)}{1 - \omega^2 L_3 (C_3 + C_2)} \text{ (Сим).}$$

Входное сопротивление цепи составит:

$$Z_{\text{вх}} = \frac{1 - \omega^2 L_3 (C_3 + C_2)}{j\omega (C_1 + C_2 - \omega^2 L_3 (C_3 C_1 + C_2 C_1 + C_3 C_2))} \text{ (Ом).}$$

Если приравнять числитель к нулю, то получим резонансную частоту, соответствующую резонансу напряжений:

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_3 (C_3 + C_2)}} = \frac{1}{\sqrt{6 \cdot 10^{-3} (60 + 120) 10^{-6}}} = \frac{10^4}{\sqrt{6 \cdot 18}} = 962 \text{ (рад/с).}$$

Если приравнять знаменатель к нулю, то получим резонансную частоту, соответствующую резонансу токов:

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{L_3 (C_1 C_2 + C_1 C_3 + C_2 C_3)}} = \sqrt{\frac{(120 + 60) 10^{-6}}{6 \cdot 10^{-3} (120 \cdot 120 + 60 \cdot 120 + 60 \cdot 120) 10^{-12}}} = \sqrt{\frac{180 \cdot 10^9}{6 \cdot 28800}} = 1020 \text{ (рад/с).}$$

График частотной характеристики входного сопротивления приведен на рис. 5.3.

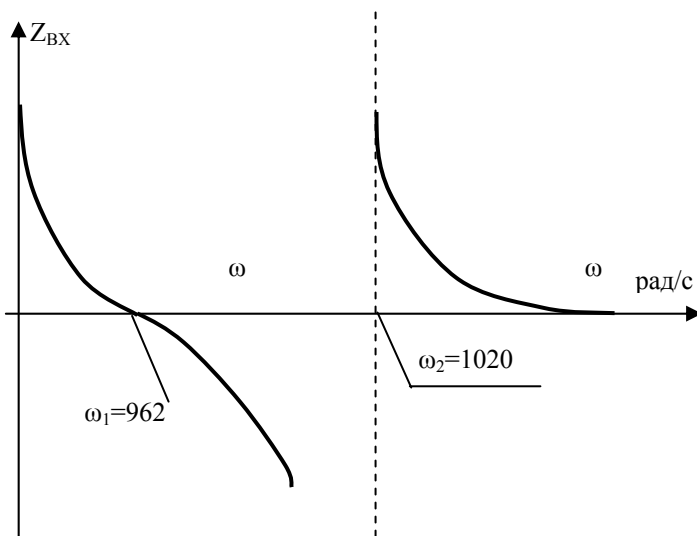


Рис. 5.3. График амплитудно-частотной характеристики входного сопротивления.

* Значения тригонометрических функций приведены в Приложении, таблица П1.

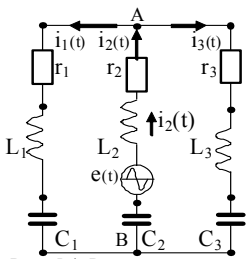


Рис. 5.4. Разветвленная цепь с источником ЭДС

РГР № 5.1. Задание для самостоятельного решения

Из обобщенной разветвленной цепи с источником синусоидального тока (рис. 5.4) нарисовать расчетную схему и выполнить расчет следующих параметров:

$e(t)$, $i_1(t)$, $i_2(t)$, $i_3(t)$, $u_R(t)$, $u_L(t)$, $u_C(t)$, S , Q , P , $\cos\varphi$;

- построить векторную диаграмму напряжений и токов;

Величины элементов схемы (данные в таблице 5.1) соответствуют: R (Ом), L (Гн), C (мкФ).

Таблица 5.1. Задание для РГР № 5 - для группы №1.

Значения параметров элементов в расчетной схеме для РГР № 5.1

№	R ₁	L ₁	C ₁	R ₂	L ₂	C ₂	R ₃	L ₃	C ₃	Дополнительн. параметр
№	Ом	Гн	мкФ	Ом	Гн	мкФ	Ом	Гн	мкФ	
1	20	0	5000	14	0	2000	23	0,040	500	$u_{C3(t)} = 40\sin(400t-36^\circ)$
2	14	0,015	0	10	0	1000	10	0,020	0	$u_{C2(t)} = 22,5\sin(400t-66^\circ 24')$
3	23	0	1000	30	0,030	0	12	0	1000	$u_{L2(t)} = 35\sin(200t+72^\circ 30')$
4	10	0	625	25	0	0	10	0,020	625	$i_1(t) = 3 \sin(400t+23^\circ 36')$
5	40	0,009	0	0	0,009	500	16	0	250	$e(t) = 15 \sin 500t$
6	16	0	2500	20	0,008	0	33	0,008	0	$i_3(t) = 5,5 \sin 100t$
7	0	0,20	1000	30	0,025	0	13	0	1000	$u_{C1(t)} = 50\sin(400t-66^\circ 24')$
8	10	0,010	0	14	0	312,5	27	0,010	0	$u_{L1(t)} = 32,5\sin(400t+53^\circ 6')$
9	17	0	5000	22	0	1000	30	0,060	0	$u_{L3(t)} = 45\sin(100t+53^\circ 6')$
10	14	0,010	0	40	0,008	0	23	0	500	$i_1(t) = 4 \sin 500t$
11	5	0	625	0	0,005	500	14	0	625	$i_2(t) = 5,25 \sin 400t$
12	24	0,025	0	10	0,025	0	22	0	800	$i_3(t) = 6,5 \sin 250t$
13	15	0	1000	20	0	500	26	0,008	0	$e(t) = 15 \sin 500t$
14	25	0	500	15	0,010	0	16	0,005	0	$u_{C1(t)} = 27,5\sin(500t-11^\circ 36')$
15	16	0,06	250	0	0,06	100	15	0	125	$i_2(t) = 25 \sin(100t+30^\circ)$
16	10	0,010	0	16	0	250	36	0	250	$u_{L1(t)} = 40 \sin(500t+30^\circ)$
17	12	0	312,5	14	0	312	17	0,010	0	$i_1(t) = 3,5 \sin(400t+60^\circ)$
18	16	0,1	0	15	0,050	0	0	0,018	1000	$i_2(t) = 4,75 \sin 500t$
19	0	0,25	1000	25	0,010	0	10	0,012	0	$i_3(t) = 6(\sin 200t+84^\circ 12')$
20	20	0	2500	13	0	2500	23	0,025	0	$u_{L3(t)} = 40 \sin(500t+30^\circ)$
21	26	0,012	0	24	0	200	20	0,008	0	$u_{C2(t)} = 30 \sin 1000t-30^\circ$
22	13	0	2500	18	0,05	0	14	0	2500	$u_{L2(t)} = 42,5\sin(100t+84^\circ 12')$
23	14	0,010	400	0	0,08	0	23	0	500	$i_1(t) = 4 \sin 500t$
24	10	0	600	18	0,06	0	0	0,05	250	$e(t) = 25 \sin 200t$
25	12	0,15	0	16	0,25	0	13	0,025	0	$i_3(t) = 6,25 \sin 200t$
26	0	0,1	625	10	0,04	0	25	0	625	$i_2(t) = 4 \sin(400t-30^\circ)$
27	10	0,03	0	10	0,1	0	20	0	250	$u_{L1(t)} = 60 \sin(500t+30^\circ)$
28	26	0,06	250	50	0	100	15	0	0	$u_{C2(t)} = 60 \sin 400t$
29	14	0,2	250	0	0,06	0	15	0	125	$u_{C3(t)} = 60 \sin 400t$
30	0	0,12	1250	40	0,08	1000	0	0,15	0	$i_2(t) = 2 \sin(400t-30^\circ)$

РГР № 5.2. Задание для самостоятельного решения - для группы №2

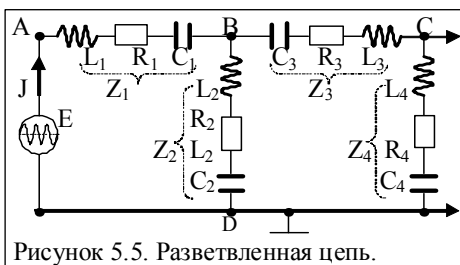


Рисунок 5.5. Разветвленная цепь.

Для рисунка 5,5 выполнить расчет:

1. Определить параметры цепи: Z_b , U_b , I_b , I_2 , I_3 , I_4 , P , Q , S комплексным методом.
2. Построить векторную диаграмму токов и напряжений отдельных участков.
3. Параметры элементов приведены в таблице № 5.3. .

Таблица 5.2. Значения параметров элементов к схеме для РГР № 5.2

№	Действ. парам.			Z ₁		Z ₂		Z ₃			Z ₄				
	E _И	I ₁	ω	R ₁	L ₁	C ₁	R ₂	L ₂	C ₂	R ₃	L ₃	C ₃	R ₄	L ₄	C ₄
№	В	А	рад	Ом	Гн	мкФ	Ом	Гн	мкФ	Ом	Гн	мкФ	Ом	Гн	мкФ
1	40	-	150	0	0,1	666	15	0	333	28	0,15	0	10	0,04	666
2	-	3	200	15	0	800	16	0,04	0	18	0,06	500	0	0,08	400
3	50	-	250	16	0,04	0	10	0,05	400	0	0,06	800	40	0	200
4	-	4	300	10	0,04	333	0	0,06	666	38	0	999	16	0,08	0
5	60	-	350	0	0,02	952	14	0	714	14	0,04	0	28	0,06	570
6	-	5	400	14	0	500	18	0,02	0	10	0,04	250	0	0,06	625
7	80	-	100	24	0,16	0	26	0,08	500	0	0,2	800	18	0	600

8	-	6	200	16	0,08	600	0	0,10	800	40	0	400	10	0,5	0
9	70	-	300	0	0,05	800	18	0	600	25	0,07	0	26	0,06	400
10	-	7	400	10	0	250	25	0,10	0	16	0,08	500	0	0,05	625
11	90	-	500	18	0,07	0	10	0,08	200	0	0,06	400	14	0	500
12	-	2	600	15	0,03	416	0	0,04	800	18	0	500	25	0,06	0
13	60	-	150	0	0,20	333	20	0	666	15	0,12	0	18	0,16	440
14	-	4	200	12	0	400	14	0,09	0	18	0,08	500	0	0,07	800
15	80	-	250	15	0,04	0	10	0,08	400	0	0,06	600	22	0	500
16	-	5	300	10	0,04	500	0	0,06	600	28	0	900	20	0,05	0
17	100	-	350	0	0,06	300	15	0	900	20	0,04	0	15	0,07	800
18	-	6	400	17	0	250	18	0,025	0	30	0,05	600	0	0,06	400
19	40	-	100	16	0,10	0	14	0,08	700	0	0,15	900	25	0	800
20	-	2	200	24	0,05	500	0	0,09	900	16	0	600	18	0,06	0
21	50	-	300	0	0,06	300	16	0	600	14	0,05	0	24	0,08	900
22	-	8	400	15	0	400	17	0,04	0	15	0,06	600	0	0,07	700
23	60	-	500	18	0,06	0	25	0,05	400	0	0,04	500	16	0	300
24	-	5	600	27	0,04	500	0	0,06	400	18	0	800	20	0,05	0
25	60	-	500	18	0,08	0	25	0,08	400	0	0,08	500	16	0	200
26	-	5	600	27	0,12	500	0	0,06	400	18	0	800	20	0,07	0
27	60	-	800	18	0,05	0	25	0,12	400	0	0,06	500	16	0	400
28	-	5	600	27	0,10	500	0	0,09	400	18	0	800	20	0,09	0
29	60	-	400	18	0,09	0	25	0,05	400	0	0,04	500	16	0	600
30	-	5	200	27	0,03	500	0	0,07	400	18	0	800	20	0,06	0

ТЕМА № 6

Оценка параметров трехфазных цепей с различными нагрузками (8)

Цель занятия: Анализ и оценка рабочих параметров трехфазной цепи с активной и реактивной нагрузкой, соединенной по схеме звезда или треугольник.

В данной теме показаны особенности оценки параметров трехфазных цепей с нагрузками, соединенными по схеме звезда или треугольник, а также с принципами построения векторных диаграмм для симметричной и несимметричной нагрузки.

Пример 1. В 4-х проводную трехфазную сеть (рис. 6.1) с линейным напряжением $U_L = 380В$ включена звездой несимметричная нагрузка: в фазе А - конденсатор с сопротивлением $X_{C(A)} = 10 Ом$; в фазе В - катушка индуктивности с сопротивлением $R_{L(B)} = 8 Ом$ и $X_{L(C)} = 6 Ом$, в фазе С - активное сопротивление $R_{C(C)} = 5 Ом$.

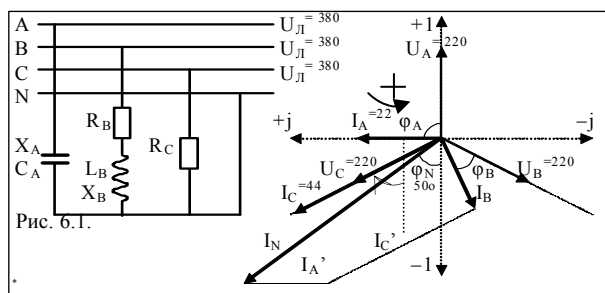


Рис. 6.1. Трехфазная цепь

Для схемы (рис. 6.1.а) определить фазные токи, начертить в масштабе векторную диаграмму цепи и найти ток в нулевом проводе.

Решение:

$$1) U_A = U_B = U_C = U_L / \sqrt{3} = 380 / 1,73 = 220 (В).$$

2. Полное сопротивление в каждой фазе:

$$Z_A = x_{C(A)} = 10 e^{-j90^\circ} (Ом); Z_B = \sqrt{R_B^2 + X_B^2} \cdot e^{j \arctg(x/r)} = 10 \cdot e^{j 36,52^\circ}; Z_C = R_C = 5 e^{j0^\circ} (Ом).$$

$$3. \text{Находим фазовые токи: } I_A = U_A / x_A = 220 \cdot e^{j0^\circ} / 10 \cdot e^{-j90^\circ} = 22 \cdot e^{+j90^\circ} (А) = j22;$$

$$I_B = U_B / Z_B = 220 \cdot e^{-j120^\circ} / 10 \cdot e^{j36,52^\circ} = 22 \cdot e^{-j156,52^\circ} (А); \quad \bar{I}_B = -20,23 - j8,64;$$

$$I_C = U_C / R_C = 220 \cdot e^{j120^\circ} / 5 \cdot e^{j0^\circ} = 44 \cdot e^{j120^\circ} (А). \quad \bar{I}_C = -22 + j38,1;$$

Вектор тока I_A опережает вектор напряжения U_A на угол $\varphi = 90^\circ$ (свойство С эл-та).

Вектор тока I_B отстает от вектора напряжения U_B на угол φ_B (свойства L эл-та), который определяется из выражения: $\cos \varphi_B = R_B / Z_B = 8 / 10 = 0,8$. $\varphi_B = 36^\circ 52'$.

Ток I_C совпадает с вектором напряжения U_C . Ток в нулевом проводе равен алгебраической сумме всех фазных токов $\bar{I}_N = \bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C$.

$$\bar{I}_N = (I_A \cdot \cos 90^\circ + j I_A \cdot \sin 90^\circ) + (I_B \cdot \cos^{-156,52^\circ} + j I_B \cdot \sin^{-156,52^\circ}) + (I_C \cdot \cos^{120^\circ} + j I_C \cdot \sin^{120^\circ});$$

$$\bar{I}_N = (+j22) + [22 \cdot (-0,92) + j22 \cdot (-0,392)] + [44 \cdot (-0,5) + j44 \cdot (0,866)];$$

$$\bar{I}_N = j22 + (-20,24 - j8,64) + (-22 + j38,1) = (-42,24 + j51,46) (А);$$

$$I_N = \sqrt{(-42,24)^2 + j51,46^2} \cdot \exp^{j \arctg(x/r)} = 66,45 \cdot \exp^{j-50,30^\circ} (А).$$

Далее определяем мощности, потребляемые нагрузками: ΣP ; ΣQ ; ΣS .

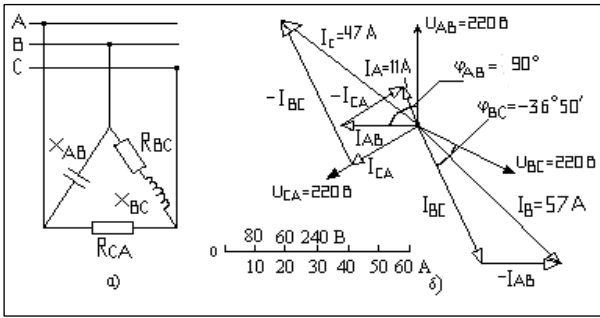
Мощность $S = U \cdot I'$ в 3-х фазной цепи находят по сопряженному току I' .

$$\text{Активная мощность: } P = P_B + P_C = I_B'^2 \cdot R_B + I_C'^2 \cdot R_C = (-20,23 + j8,64) \cdot (-20,23 + j8,64) \cdot 8 +$$

$$+ (-22 - j38,1) \cdot (-22 - j38,1) \cdot 5 = (2676,8 - j2796,48) + (-4838 + j8382) = -2161,2 + j5585,5.$$

$$P = 5988,5 \cdot \exp^{j+69,09^\circ}. \text{ Реактивная: } Q = Q_A + Q_B = I_A'^2 \cdot (-jX_A) + I_B'^2 \cdot X_B = (-j22) \cdot (-j22) \cdot$$

$$\cdot (-j10) + (-20,23 + j8,64) \cdot (-20,23 + j8,64) \cdot (j6) = +j484 + (2097 + j2007) = (2097 + j2491). (50^\circ).$$



Пример 2. В трехфазную сеть с $U_{\text{лин}} = 220$ В включена треугольником несимметричная нагрузка (рис. 6.2,а): в фазе AB – конденсатор ($X_{AB} = 10$ Ом); в фазе BC – катушка с ($R_{BC} = 4$ Ом и $X_{BC} = 3$ Ом); в фазе CA – ($R_{CA} = 10$ Ом – активное).

Рис. 6.2. Трехфазная цепь.

Определить I_{ϕ} и I_L , углы сдвига фаз и начертить векторную диаграмму цепи.

Решение. Определим фазные токи и углы сдвига фаз:

$$I_{AB} = U_{AB}/X_{AB} = 220 \cdot e^{j0^\circ} / 10 \cdot e^{-j90^\circ} = 22 \cdot e^{j90^\circ} = j22 \text{ (A)}; \text{ (ток в C эл-те}$$

опережает);

$$I_{BC} = U_{BC}/Z_{BC} = 220 \cdot e^{-j120^\circ} / 5 \cdot e^{j36^\circ 50'} = 44 \cdot e^{-j156^\circ 50'} = (-40,35 - j17,54) \text{ (A)};$$

$$I_{CA} = U_{CA}/R_{CA} = 220 \cdot e^{j120^\circ} / 10 \cdot e^{j0^\circ} = 22 \cdot e^{j120^\circ} = (-11 + j19,05) \text{ (A)};$$

$$\bar{I}_A = \bar{I}_{AB} - (\bar{I}_{CA}) = j22 - (-11 + j19,05) = j22 + 11 - j19,05 = (11 + j3) = 11,4 \cdot \exp^{j15,15^\circ} \text{ (A)};$$

$$\bar{I}_B = \bar{I}_{BC} - (\bar{I}_{AB}) = (-40,35 - j17,54) - (j22) = (-40,35 - j39,54) = 57,06 \cdot e^{j44^\circ 40'} \text{ (A)};$$

$$\bar{I}_C = \bar{I}_{CA} - (\bar{I}_{BC}) = (-11 + j19,05) - (-40,35 - j17,54) = (29,35 + j36,59) = 46,9 \cdot e^{j51^\circ 26'} \text{ (A)}.$$

Проверка: $\Sigma(\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C) = 0 = (11 + j3) + (-40,35 - j39,54) + (29,35 + j36,59) = 0.$

Далее определяем мощности, потребляемые нагрузками: ΣP ; ΣQ ; $\Sigma S.$

Мощность в 3-х фазной цепи $S = U \cdot I'$ находят через сопряженный ток I' .

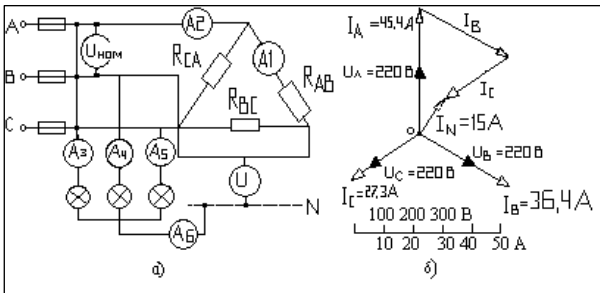
$$S = P + jQ. \text{ Активная мощность: } P = P_{BC} + P_{CA} = I'_{BC} \cdot R_{BC} + I'_{CA} \cdot R_{CA} \text{ (Вт).}$$

$$\text{Реактивная мощность: } Q = Q_{AB} + Q_{BC} = I'_{AB} \cdot X_{AB} + I'_{BC} \cdot X_{BC} \text{ (ВАР).}$$

Пример 3. В трехфазную 4-х проводную сеть с напряжением $U_{\text{лин}} = 380$ В включена печь (симметричная нагрузка с сопротивлением R , соединенная треугольником), а также включены лампы накаливания (несимметричная нагрузка по схеме звезда). Определить показания приборов, включенных в схему – рис. 6.3.

Мощность каждой фазы печи $P_{\Pi} = 10000$ Вт. Мощность лампы $P_{\text{л}} = 200$ Вт, число ламп в фазах: $n_A = 50$; $n_B = 40$; $n_C = 30$.

Решение. Находим I_{ϕ} , потребляемые печью:



$$I_{AB} = I_{BC} = I_{CA} = P_{\Pi}/U_{\text{ном}} = 10 \cdot 10000/380 = 26,3 \text{ (A).}$$

2. Линейные токи, потребляемые симметричной нагрузкой нагревательной печи:

$$I_A = I_B = I_C = \sqrt{3} \cdot 26,3 = 45,5 \text{ (A).}$$

3. Определим I_{ϕ} , потребляемые лампами, котор. соединены звездой и включены на фазные напряжения:

Рис. 6.3. Трехфазная цепь для примера № 6.3

$$U_A = U_B = U_C = U_{\text{ном}}/\sqrt{3} = 220 \text{ (В).}$$

$$\text{Фазные токи составят: } I_A = P_{\text{л}} n_A / U_A = 200 \cdot 50 / 220 = 45,4 \text{ (A).}$$

$$I_B = P_{\text{л}} n_B / U_B = 200 \cdot 40 / 220 = 36,4 \text{ A. } I_C = P_{\text{л}} n_C / U_C = 200 \cdot 30 / 220 = 27,3 \text{ (A).}$$

$$\bar{I}_N = (45,4) + j36,4 \cdot (-0,5) + j36,4 \cdot (-0,866) + j27,3 \cdot (-0,5) + j27,3 \cdot (0,866) = (13,55 - j7,87),$$

$$I_N = \sqrt{13,55^2 + (-7,87)^2} \cdot \exp^{j \arctg(x/y)} = 15,67 \cdot \exp^{-j30^\circ} \text{ (A).}$$

4. Активная мощность в любой фазе составит: $P_i = U_{\phi,i} \cdot I'_{\phi,i} = (U_{\text{ли}} \cdot I_{\text{л}}) / \sqrt{3}.$

Определяем суммарную мощность, потребляемую нагрузками.

Строим векторы линейных и фазных токов.

Пример 4. Требуется определить линейные токи в нагрузке, соединенной треугольником, которая подключена к симметричному трехфазному генератору с линейным напряжением $E_L = 220$ В. Сопротивления фаз приемника имеют значения: $Z_{AB} = Z_{BC} = 50$ Ом, $Z_{CA} = (30 + j40)$ Ом.

Схема соединений источника с нагрузкой приведена на рис. 6.4, а.

Решение. Приемник - схема с неравномерной нагрузкой фаз генератора.

Вначале определяем фазные токи (они имеют двухиндексные обозначения):

$$\bar{I}_{AB} = \bar{U}_{AB} / \bar{Z}_{AB} = 220 / 50 = 4,4 \text{ (A).}$$

$$\bar{I}_{BC} = \bar{U}_{BC} / \bar{Z}_{BC} = 220 \cdot e^{-j120^\circ} / 50 = 4,4 \cdot e^{-j120^\circ} = 4,4 \cdot (-0,5) + j4,4 \cdot (-0,866) = -2,2 - j3,81;$$

$$\bar{I}_{CA} = \bar{U}_{CA} / \bar{Z}_{CA} = 220 \cdot e^{j120^\circ} / 50 = 4,4 \cdot e^{j120^\circ} = 4,4 \cdot (-0,5) + j4,4 \cdot (0,866) = -2,2 + j3,81.$$

Затем определяем линейные токи (они обозначаются одноиндексно):

$$\bar{I}_A = \bar{I}_{AB} - (\bar{I}_{CA}) = (4,4) - (-2,2 + j3,81) = (6,6 - j3,81) = 7,62 \cdot e^{-j30^\circ} \text{ (A)};$$

$$\bar{I}_B = \bar{I}_{BC} - (\bar{I}_{AB}) = (-2,2 - j3,81) - (4,4) = (-6,6 - j3,81) = 7,62 \cdot e^{j210^\circ} \text{ (A)};$$

$$\bar{I}_C = \bar{I}_{CA} - (\bar{I}_{BC}) = (-2,2 + j3,81) - (-2,2 - j3,81) = +j7,62 = 7,62 \cdot e^{j90^\circ} \text{ (A).}$$

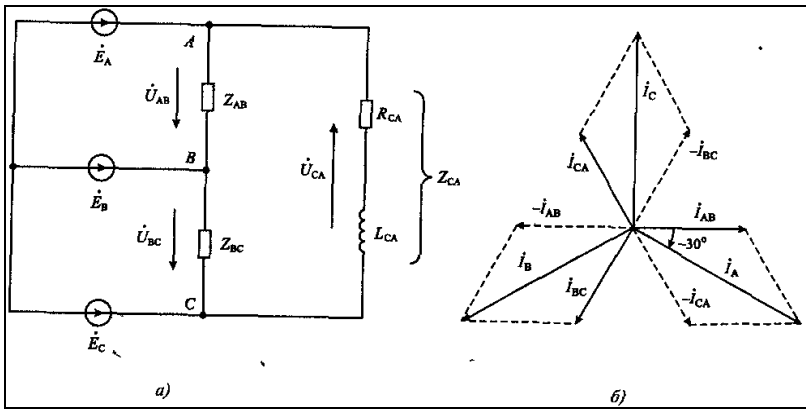
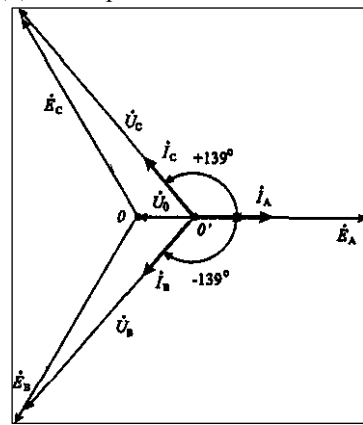


Рис. 6.4 Схема трехфазной цепи (а) и ее векторная диаграмма (б)

Сумма линейных токов в цепи составит:

Условие проверки: $\vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C = (6,6 - j3,81) + (-6,6 - j3,81) + (j7,62) = 0$

Далее определяют мощности P, Q, S.



Пример 5. Требуется определить токи в фазах приемника, *соединенного звездой* без нулевого провода, если $Z_A = 5 \text{ Ом}$, $Z_B = Z_C = 10 \text{ Ом}$, фазное напряжение генератора $E = 100 \text{ В}$. Построить векторную диаграмму для токов в цепи.

Рис. 6.5. Векторная диаграмма напряжений и токов.

Решение. Определим напряжение \vec{U}_{Nn} . Поскольку два сопротивления нагрузки имеют одно и то же значение $Z_B = Z_C$ то основную формулу (а)

$$\vec{U}_{Nn} = (\vec{E}_A Y_A + \vec{E}_B Y_B + \vec{E}_C Y_C) / (Y_A + Y_B + Y_C + Y_0), \text{ (а)}$$

можно упростить.

Учитывая, что $a^{-1} = e^{-j120^\circ} = (-1 - j\sqrt{3}/2)$, из формулы (а) получим формулу (б):

$$\vec{U}_{Nn} = \vec{E}_A (Y_B - Y_A) / (Y_B + 2Y_A) = 100(10 - 5) / (10 + 10) = 25 \text{ В}.$$

Найдем напряжения на фазах приемника: $\vec{U}_A = (\vec{E}_A - \vec{U}_0) = 100 - 25 = 75 \text{ (В)};$

$$\vec{U}_B = (\vec{E}_B - \vec{U}_0) = 100a^{-1} - 25 = [100(-0,5) + j100(-0,866)] - 25 = (-75 - j86) = 115 \cdot e^{-j139^\circ} \text{ (В)};$$

$$\vec{U}_C = (\vec{E}_C - \vec{U}_0) = 100a - 25 = [100(-0,5) + j100(0,866)] - 25 = (-75 + j86) = 115 \cdot e^{j139^\circ} \text{ (В)}.$$

Определим токи в фазах приемника: $\vec{I}_A = (\vec{U}_A / \vec{Z}_A) = 75/5 = 15 \text{ (А)};$

$$\vec{I}_B = (\vec{U}_B / \vec{Z}_B) = (115 \cdot e^{-j139^\circ}) / 10 = (11,5 \cdot e^{-j139^\circ}); \quad \vec{I}_C = (\vec{U}_C / \vec{Z}_C) = (115 \cdot e^{j139^\circ}) / 10 = (11,5 \cdot e^{j139^\circ}).$$

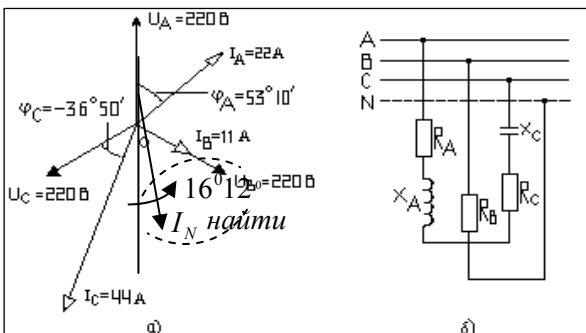
Пример 6. Обратная задача. По векторной диаграмме для трехфазной цепи (рис. 6.6), с нагрузкой, включенной по схеме звезда (с известными фазными токами), определить характер нагрузки каждой фазы и вычислить сопротивление ветвей, а также определить алгебраическ. \underline{I} и \underline{I}_N и мощности P, Q, S. Начертить схему цепи.

Решение. На диаграмме видно, что ток в фазе A отстает от фазного напряжения U_A на угол $\varphi_A = -53^\circ 10'$. Следовательно, в фазу A включена катушка и резистор с полным сопротивлением $Z_A = U_A / I_A = 220/22 = 10 \text{ Ом}$. (где $X_L > R$)

Для цепи (рис. 6.6) определим активное и индуктивное сопротивление:

$$R_A = Z_A \cdot \cos' \varphi_A = 10 \cos' (+53^\circ 10') = 10 \cdot 0,6 = 6 \text{ (Ом)}; \quad (\cos' - \text{сопряжен. угол}).$$

$$X_A = jZ_A \cdot \sin' \varphi_A = j10 \sin' (+53^\circ 10') = j10 \cdot 0,8 = j8 \text{ (Ом)}. \quad (\sin' - \text{сопряжен. угол}).$$



В фазе B ток I_B совпадает с напряжением U_B значит в фазу B включен резистор

$$R_B = U_B / I_B = 220/11 = 20 \text{ (Ом)}.$$

В фазе C ток I_C опережает напряжение U_C на угол $\varphi_C = 36^\circ 50'$ (вектор вращают про тив час. стрелки); значит в фазу C включены конденсатор и актив. сопротивление.

Рис. 6.6. Обратная задача.

Полное сопротивление фазы C : (где $R > X_C$); $[\cos', \sin' - \text{сопряжен. углы}]$.

$$Z_C = U_C / I_C = 220/44 = 5 \text{ (Ом)}; \quad R_C = Z_C \cos' \varphi_C = 5 \cos' (-36^\circ 50') = 5 \cdot 0,8 = 4 \text{ (Ом)};$$

$$x_C = Z_C \sin \varphi_C = 5 \sin' (-36^\circ 50') = -j5 \cdot 0,6 = -j3 \text{ (Ом)}. \quad \cos', \sin' - \text{сопряжен. угол}$$

$$2. \underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = (13,2 - j17,6) + (-5,5 - j9,52) + (-40,46 + j17,29) = -32,76 - j9,52 = 34,11 \cdot e^{j16^\circ 12'}$$

3. Определяем мощности, потребляемые цепью. Активная мощность составит:

$$P = P_A + P_B + P_C = I_A^2 \cdot R_A + I_B^2 \cdot R_B + I_C^2 \cdot R_C = 22^2 \cdot 6 + 11^2 \cdot 20 + 44^2 \cdot 4 = 13 \text{ 065 (Вт)}.$$

Реактивная мощность составит:

$$Q = Q_A + Q_C = I_A^2 \cdot X_L + I_C^2 \cdot X_C = 22^2 \cdot j8 + (44^2 \cdot -j3) = -j1936 \text{ ВАР} = -1,93 \text{ (кВАр)}.$$

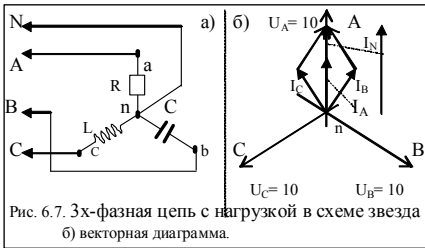


Рис. 6.7. 3х-фазная цепь с нагрузкой в схеме звезда б) векторная диаграмма.

$$I_C = U_C / X_L = 10 \cdot e^{j120^\circ} / 10 \cdot e^{j90^\circ} = 1 \cdot e^{j30^\circ}$$

$$I_N = I_A + I_B + I_C = 1 + (0,866 - j0,5) + (0,866 + j0,5) = 2,732$$

Поменяв местами элементы цепи $\varphi = 120^\circ$.

Пример 7. Сравним значение тока в нулевом проводе и положение его вектора при перестановке элементов фазных нагрузок, включенных по схеме звезда. Определим параметры цепи для схемы на рис. 6.7 и рис. 6.8.

Дано: $U_\phi = 10V$; $R = 10$; $X_L = j10$; $X_C = -j10$;

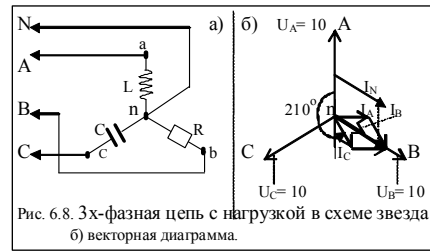


Рис. 6.8. 3х-фазная цепь с нагрузкой в схеме звезда б) векторная диаграмма.

$$I_A = U_A / R_A = 10 \cdot e^{j0^\circ} / 10 \cdot e^{j0^\circ} = 1 (A).$$

$$I_B = U_B / X_C = 10 \cdot e^{-j120^\circ} / 10 \cdot e^{-j90^\circ} = 1 \cdot e^{-j30^\circ} (A).$$

$$I_C = U_C / X_L = 10 \cdot e^{j120^\circ} / 10 \cdot e^{j90^\circ} = 1 \cdot e^{j30^\circ} (A).$$

$$I_N = I_A + I_B + I_C = 1 + (0,866 - j0,5) + (0,866 + j0,5) = 2,732$$

увидим, что вектор тока I_N повернется на $\varphi = 120^\circ$.

Дано: $U_\phi = 10V$; $R = 10$; $X_L = j10$; $X_C = -j10$;

$$I_A = U_A / X_L = 10 \cdot e^{j0^\circ} / 10 \cdot e^{j90^\circ} = 1 \cdot e^{-j90^\circ} (A).$$

$$I_B = U_B / X_C = 10 \cdot e^{-j120^\circ} / 10 \cdot e^{-j90^\circ} = 1 \cdot e^{-j120^\circ} (A).$$

$$I_C = U_C / X_C = 10 \cdot e^{j120^\circ} / 10 \cdot e^{-j90^\circ} = 1 \cdot e^{j210^\circ} (A).$$

$$I_N = I_A + I_B + I_C = -j1 + (-0,5 - j0,866) + (-0,866 - j0,5) = -1,366 - j2,366 = 2,73 \cdot e^{j60^\circ} (A).$$

Если вновь переместить элементы R, L, C, то вектор тока I_N вновь повернется на $\varphi = 120^\circ$.

РГР № 6.2. Задание для самостоятельного решения - для группы №1.

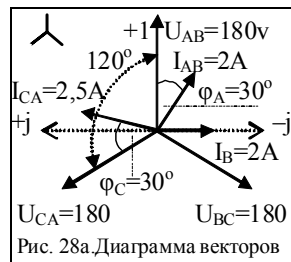
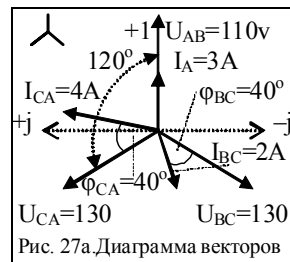
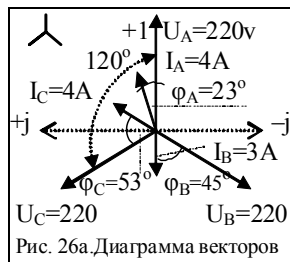
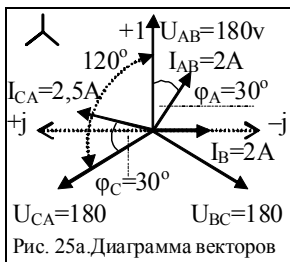
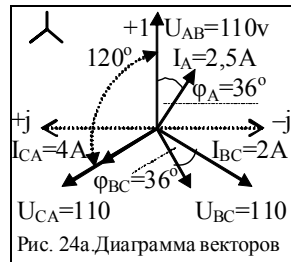
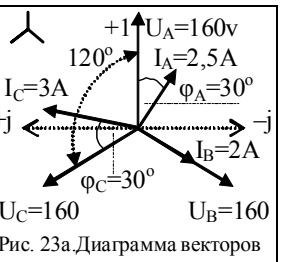
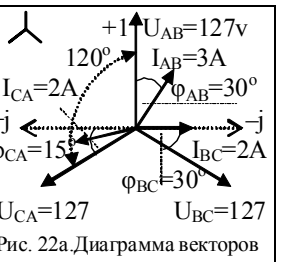
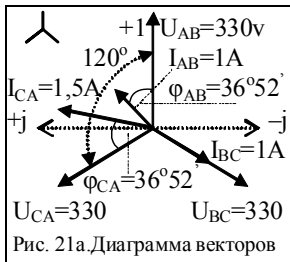
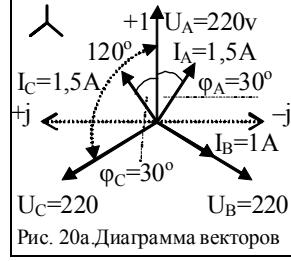
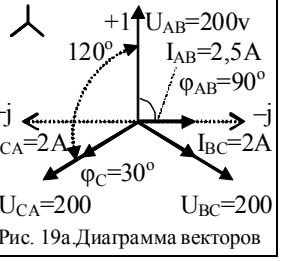
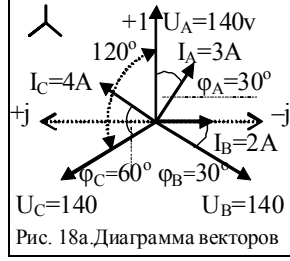
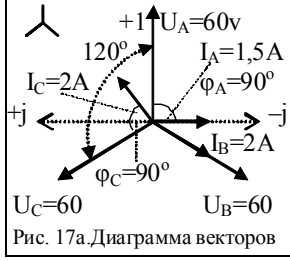
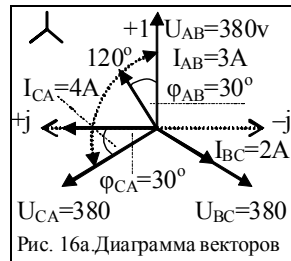
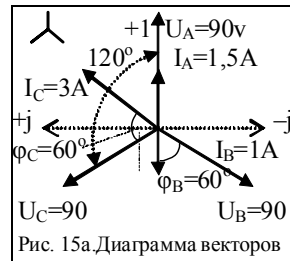
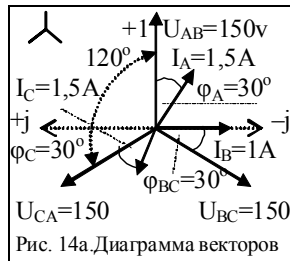
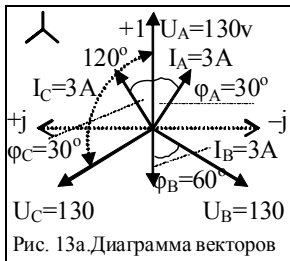
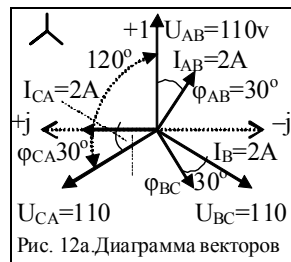
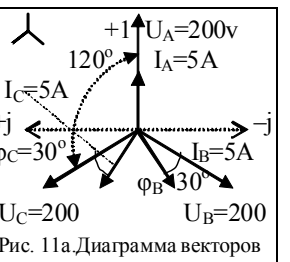
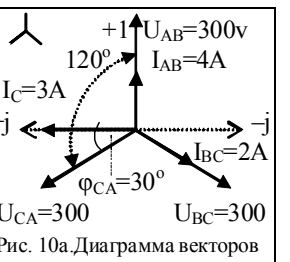
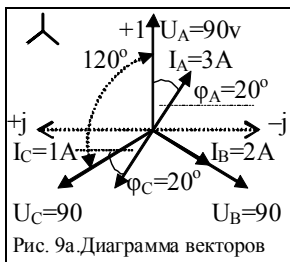
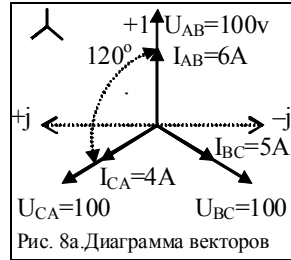
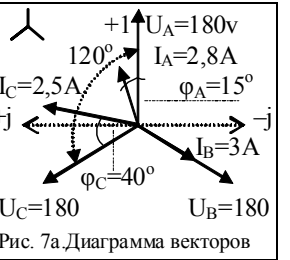
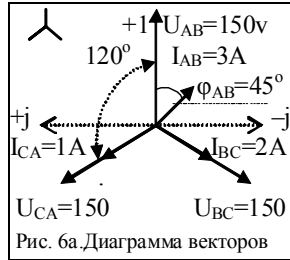
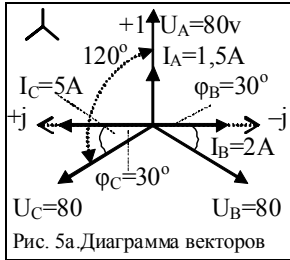
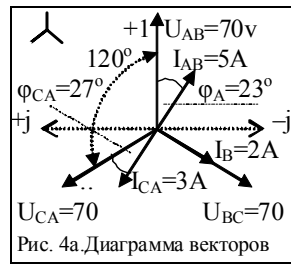
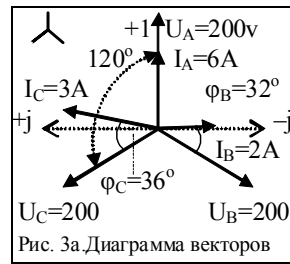
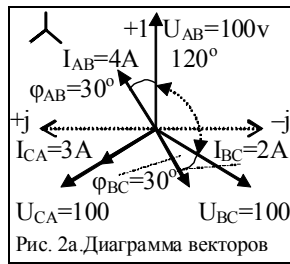
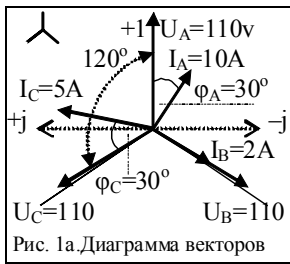
1. Выполнить расчет параметров трехфазной цепи с нагрузкой (рис. 6.2 и 6.3).
 2. Показать векторные диаграммы токов и напряжений.
- Варианты и параметры элементов (для рис. 6.2 и 6.3) приведены в таблице № 6.1

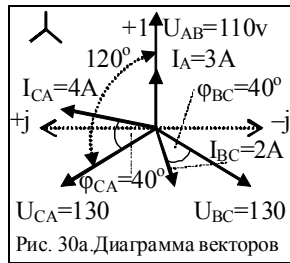
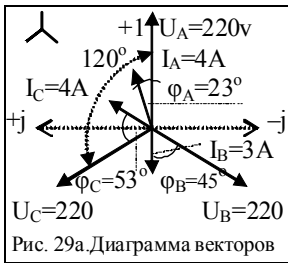
Таблица 6.1. Параметры для индивидуального задания по теме трехфазные цепи

№	схема вкл. нагрузки	$U_{л-}$ (В)	ω рад/с	R_A (Ом)	$X_{A,L}$ (Ом)	$X_{A,C}$ (Ом)	R_B (Ом)	$X_{B,L}$ (Ом)	$X_{B,C}$ (Ом)	R_C (Ом)	$X_{C,L}$ (Ом)	$X_{C,C}$ (Ом)			
1	Звезда.	110	250	80		60	100	-	25	80	50	-			
2	Треугольник	110	250	100	50	-	-	150	80	100	-	50			
3	Звезда.	220	314	150	200		300	100	-		210	100			
4	Треугольник	220	314	-	40	140	300	60		200	30	-			
5	Звезда.	330	380	200	-	35	-	100	30	100		80			
6	Треугольник	330	380	250	100	-	200	-	60	-	200	80			
7	Звезда.	380	500	150	250	-	330	-	200	300		80			
8	Треугольник	380	500	330	-	55	330	100	-		120	300			
9	Звезда.	440	628	100	200	-	220	-	150	-	100	40			
10	Треугольник	440	628	90	-	30	100		50	110	30				
11	Звезда.	110	250	60	-	220	100	300	-	60		80			
12	Треугольник	110	250	55	100	-	75	-	600	100	100	-			
13	Звезда.	220	314		200	50	85		50		40	200			
14	Треугольник	220	314	120	-	60	-	30	130	200	-	60			
15	Звезда.	330	380	160	-	350	140	60		180	50	-			
16	Треугольник	330	380		220	100	50		250	50	33	-			
17	Звезда.	380	500	100	-	300	100	150	-	100		50			
18	Треугольник	380	500	70	350	-	-	200	50	100	220				
19	Звезда.	440	628	220		55	140	-	100	70	-	44			
20	Треугольник	440	628	-	160	50	40	-	80	50	130				
21	Звезда.	110	250	300	100	-	200	150	-	50	-	150			
22	Треугольник	110	250	180		110	-	190	100	100	-	200			
23	Звезда.	220	314	300		50	600	-	75	-	50	280			
24	Треугольник	220	314	250	80	-	-	260	60	220		44			
25	Звезда.	330	380	300	-	55	300	-	200	-	140	66			
26	Треугольник	330	380	-	175	75	200	45		200	100	-			
27	Звезда.	380	500	300	66	-	400	-	200	100	44	44			
28	Треугольник	380	500	-	180	80	200	30	-	200	-	55			
29	Звезда.	440	628	300	-	100		80	180		140	60			
30	Треугольник	440	628	200	100		100	-	380	230	-	80			

РГР № 6.2. Задание для самостоятельного решения - для группы №2

По векторной диаграмме построить схему и определить параметры цепи





*Значения тригонометрических функций приведены в приложении, таблица П1.

ТЕМА №7

Оценка потребления электрической мощности и методы ее экономии (4)

Цель занятия: Оценка параметров электропотребления условным предприятием; определение величины и характера нагрузки; оценка влияния сопротивления линий передач R_0 ; способы экономии потребляемой электроэнергии за счет компенсации реактивной мощности в нагрузке и повышение коэффициента мощности до рационального значения: $\text{Cos}\varphi_{\text{РАЦ}} = 0,96 \div 0,98$; ($\text{tg}\varphi_{\text{РАЦ}} = 0,3 \div 0,2$); ($\varphi = 16^\circ \div 11^\circ$).

Для электрической схемы условного предприятия (рис. 7.1) необходимо:

- определить параметры: Z , $e(t)$, $i(t)$, $u_{R(t)}$, $u_{C(t)}$, $u_{AB(t)}$, $u_{L(t)}$, P , Q , S , $\text{Cos}\varphi$, ($\text{tg}\varphi$).
- оценить зависимость нагрузки на сеть в функции угла сдвига фаз в неразветвленной ее части и построить векторную диаграмму напряжений и токов;
- оценить влияние сопротивления проводов R_0 на потери напряжения в линии и на экономическую эффективность всей нагрузки;
- улучшить коэффициент мощности $\text{Cos}\varphi$ ($\text{tg}\varphi$) до рациональных значений;
- найти экономический эффект от модернизации схемы с нагрузками.

Исходные данные: $R_0 = 0,175(\text{Ом})$; $R_1 = 0,465(\text{Ом})$; $R_2 = 4,12(\text{Ом})$; $R_3 = 1,0(\text{Ом})$;
 $C = 3200 \cdot 10^{-6}(\text{Ф})$; [$L_{\text{ЭКВ}} = 0,0325 \text{ Гн} = (n_L = 50 \text{ дв.} \cdot L = 1,625 \text{ Гн})$]; $U_{AB} = 220\text{В}$; $f = 50\text{Гц}$.

Задачу можно решать классическим или символическим методом.

1. Электрические параметры в 1-ой ветви

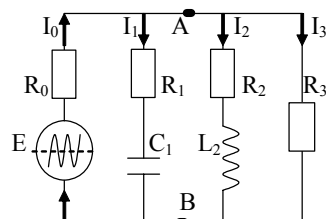


Рис. 7.1. Схема замещения цепи потребления электроэнергии условным предприятием

$$X_C = 1/\omega C = 1/(2\pi \cdot f \cdot C) = 1/(314 \cdot 3200 \cdot 10^{-6}) = 0,997.$$

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_C^2} = \sqrt{0,465^2 + 0,997^2} = 1,1(\text{Ом}).$$

$$I_1 = U_{AB}/Z_1 = 220/1,1 = 200(\text{А}).$$

Коэффициент мощности

$$\text{Cos}\varphi_1 = R_1/Z_1 = 0,465/1,1 = 0,4226; \varphi_1 = 65^\circ.$$

$$\text{Sin}\varphi_1 = X_C/Z_1 = 0,997/1,1 = 0,9063; \varphi_1 = 65^\circ.$$

Активная и реактивно-емкостная составляющая тока:

$$I_{1,A} = I_1 \cdot \text{Cos}\varphi_1 = 200 \cdot 0,4226 = 84,52 \text{ А}.$$

$$I_{1,P} = I_1 \cdot \text{Sin}\varphi_1 = 200 \cdot 0,9063 = +181,26 \text{ А}. \text{ (в C – свойство опережения +I_C)}$$

Скорость и темп преобразования энергии (мощности)

$$S_1 = U_{AB} \cdot I_1 = 220 \cdot 200 = 44\,000(\text{ВА}).$$

$$P_1 = U_{AB} \cdot I_{1,A} = 220 \cdot 84,52 = 18\,594(\text{Вт}).$$

$$Q_1 = U_{AB} \cdot I_{1,P} = 220 \cdot -j181,26 = -j39\,877(\text{Вар}). \text{ (I}_{1,P} \text{ – сопряженный ток)}$$

2. Электрические параметры во второй ветви

$$X_L = \omega L = 2\pi \cdot f \cdot L = 314 \cdot 0,0325 = 10,2(\text{Ом}).$$

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_L^2} = \sqrt{4^2 + 10,2^2} = 11(\text{Ом}).$$

$$I_2 = U/Z_2 = 220/11 = 20(\text{А}).$$

Коэффициент мощности в индуктивной нагрузке

$$\text{Cos}\varphi_2 = R_2/Z_2 = 4,12/11 = 0,3636; \varphi_2 = 68^\circ.$$

$$\text{Sin}\varphi_2 = X_L/Z_2 = 10,2/11 = 0,9272; \varphi_2 = 68^\circ.$$

Активная и реактивно-индуктивная составляющая тока:

$$I_{2,A} = I_2 \cdot \text{Cos}\varphi_2 = 20 \cdot 0,3636 = 7,27(\text{А}).$$

$$I_{2,P} = I_2 \cdot \text{Sin}\varphi_2 = 20 \cdot 0,9272 = -18,54(\text{А}). \text{ (в L – отставание тока – I_L)}$$

Скорость и темп преобразования энергии (мощности)

$$S_2 = U_{AB} \cdot I_2 = 220 \cdot 20 = 4400(\text{ВА}).$$

$$P_2 = S_2 \cdot \text{Cos}\varphi_2 = 4400 \cdot 0,3636 = 1600(\text{Вт}).$$

$$Q_2 = S_2 \cdot \text{Sin}\varphi_2 = 4400 \cdot 0,9272 = +4079(\text{ВАр}). \text{ (+Q}_1 \text{ положит. – свойство L)}$$

3. Электрические параметры в третьей ветви

$$Z_3 = R_3 = 1,0 \text{ (Ом)}.$$

$$I_3 = U/Z_3 = 220/1,0 = 220 \text{ (А)}.$$

$$\cos \varphi_3 = R_3/Z_3 = 1,0; \quad \varphi_3 = 0^\circ.$$

Активная составляющая тока:

$$I_{3,A} = I_3 \cdot \cos \varphi_3 = 220 \cdot 1 = 220 \text{ (А)}.$$

Полная, активная мощность

$$S_3 = P_3 = U_{AB} \cdot I_3 = 220 \cdot 220 = 48400 \text{ (ВА)}.$$

4. Электрические характеристики всей схемы

Активный, реактивный и полный составляющие тока в неразветвленной части цепи

$$I_A = I_{1,A} + I_{2,A} + I_{3,A} = 84,52 + 7,27 + 220 = 311,8 \text{ (А)}.$$

$$I_P = I_{1,P} - I_{2,P} + I_{3,P} = 181,26 - 18,54 + 0 = +162,72 \text{ (А)}.$$

$$I = \sqrt{I_A^2 + I_P^2} = \sqrt{311,8^2 + 162,72^2} = 351,71 \text{ (А)}.$$

Коэффициенты мощности и угол сдвига фаз

$$\cos \varphi = I_A/I = 311,8/351,71 = 0,8865; \quad (\varphi_3 = 27^\circ 33').$$

$$\sin \varphi = I_P/I = 162,72/351,71 = 0,4626; \quad (\varphi_3 = 27^\circ 33').$$

$$\operatorname{tg} \varphi = I_P/I_A = 162,72/311,8 = 0,5218; \quad (\varphi_3 = 27^\circ 33').$$

Полная активная и реактивная мощности электропотребителя:

$$S = U_{AB} \cdot I = 220 \cdot 351,71 = 77\,376 \text{ (ВА)};$$

$$P = U_{AB} \cdot I_A = 220 \cdot 311,8 = 68596 \text{ Вт}. \quad [P = S \cdot \cos \varphi = 77376 \cdot 0,8865 = 68594 \text{ Вт}];$$

$$Q = U_{AB} \cdot I_P = 220 \cdot 162,72 = 35798 \text{ Вар}. \quad [Q = P \cdot \operatorname{tg} \varphi = 68591 \cdot 0,5218 = 35798 \text{ Вар}].$$

5. Проверка правильности расчета

$$\Sigma P = P_1 + P_2 + P_3 = 18594 + 1600 + 48400 = 68594 \text{ (Вт)};$$

$$\Sigma Q = -Q_1 + Q_2 + Q_3 = -39877 + 4079 + 0 = -35798 \text{ (ВАр)};$$

$$\Sigma S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{68594^2 + 35798^2} = (77376) \text{ ВА}.$$

6. Построение векторной диаграммы

Из векторной диаграммы видно, что цепь энергопотребителя создает активно-емкостную нагрузку. Для достижения рациональных условий работы нагрузок необходимо в схеме дополнительно установить индуктивный компенсатор.

Это позволит снизить коэффициент мощности потерь до значения:

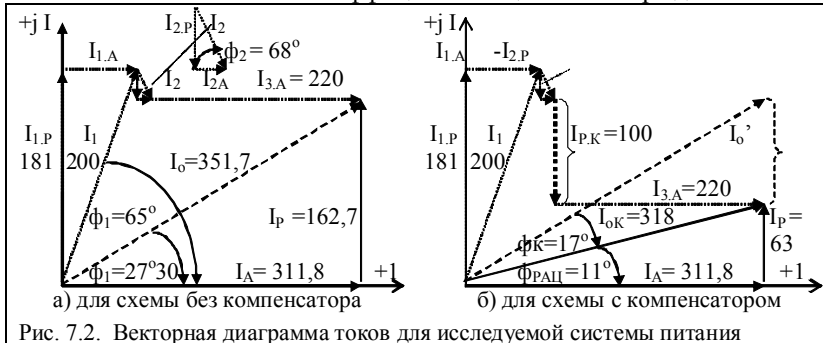


Рис. 7.2. Векторная диаграмма токов для исследуемой системы питания

$$\operatorname{tg} \varphi_{\text{РАЦ}} = 0,3 - 0,2 \text{ или } \cos \varphi_{\text{РАЦ}} = 0,96 - 0,98 \quad (\varphi_{\text{РАЦ}} \leq 16,5^\circ - 11^\circ).$$

7. Определение экономического эффекта от установки компенсатора

Определим расчетную величину реактивного тока, который должен быть скомпенсирован ($I_{P, \text{КОМП}}$), например, из условия, $\operatorname{tg} \varphi_{\text{РАЦ}} \approx 0,20$ ($\varphi_{\text{РАЦ}} \approx 11^\circ$).

$$\operatorname{tg} \varphi_{\text{КОМП}} = (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_{\text{РАЦ}}) = (0,5218 - 0,20) \approx 0,32; \quad (\varphi_{\text{КОМП}} \approx 17^\circ 44');$$

$$I_{P, \text{КОМП}} = I_A \cdot (\operatorname{tg} \varphi_{\text{КОМП}}) = 311,8 \cdot (0,32) \approx 100 \text{ (А)}.$$

В данном случае в качестве компенсатора необходимо применить батарею дроссельных катушек с эквивалентной (суммарной) индуктивностью $L_{\text{КОМП}}$.

$$L_{\text{КОМП}} = U_{AB} / (\omega \cdot I_{P, \text{КОМП}}) = 220 / (314 \cdot 100) = 0,007 \text{ (Гн)} \approx (\parallel 0,7/100 \text{ мГн}).$$

Примечание. В случае активно-индуктивной нагрузки необходимо установить в схему конденсаторный компенсатор емкость которого (Φ), для расчетной реактивной составляющей тока ($I_{P, \text{КОМП}}$), составит:

$$\{C_{\text{КОМП}} = I_{P, \text{КОМП}} / (\omega \cdot U_{AB}) - [100 / (314 \cdot 220)] = 0,001447 \text{ (Ф)} \approx 1440 \text{ (мкФ)}\}$$

Реактивная мощность компенсатора (ВАр) составит:

$$Q_{\text{КОМП}} = U_{AB} \cdot I_{P, \text{КОМП}} = 220 \cdot 100 = 22\,000 \approx 22 \text{ (кВАр)}.$$

Общий ток потребителей в искусственных условиях компенсации, составит:

$$I_{0, \text{КОМП}} = \sqrt{\Sigma P^2 + (\Sigma -Q + Q_K)^2} / U_{AB} = \sqrt{68594^2 + (-35798 + 22000)^2} / 220 = 318 \text{ (А)}.$$

Экономия электрической энергии при обеспечении искусственного (требуемого) $\operatorname{tg} \varphi_{\text{КОМП}} = 0,32$ за год при рабочем годовом времени 8760 (час).

$$\Delta W = R_0 \cdot (I_0^2 - I_{0, \text{КОМП}}^2) \cdot t_p = 0,175(351,7^2 - 318^2) \cdot 8760 = 34\,598 \text{ (кВт}\cdot\text{ч)}.$$

Экономический денежный эффект при стоимости энергии $c_w = 2$ (р/кВт·ч)

$$\Delta C_1 = c_w \cdot \Delta W = 34\,598 \cdot 2 = 69\,196 \text{ р.}$$

Необходимая величина напряжения (В) на входе линии электропитания и потери мощности (Вт) в проводах в естественных условиях составили:

$$E = U_{AB} + (R_0 \cdot I_0) = 220 + (0,175 \cdot 351,7) = 220 + 61,5 = 281,5 \text{ (В)};$$

$$P_0 = R_0 \cdot I_0^2 = 0,175 \cdot 351,7^2 = 21\,646 \text{ (Вт/час)},$$

и в условиях искусственного коэффициента мощности:

$$E_{\text{КОМП}} = U_{AB} + (R_0 \cdot I_{0, \text{КОМП}}) = 220 + (0,175 \cdot 318) = 220 + 55,6 = 275,6 \text{ (В)}$$

$$P_{0, \text{КОМП}} = R_0 \cdot I_{0, \text{КОМП}}^2 = 0,175 \cdot 318^2 = 17\,696 \text{ (Вт/час)}.$$

В результате введения компенсатора мощность потерь в проводах снизится на величину: $\Delta P_{0, \text{К}} = P_0 - P_{0, \text{КОМП}} = 21\,646 - 17\,696 = 3\,950$ (кВт·ч),

либо за год: $\Delta P_{0, \text{К.ГОД}} = \Delta P_{0, \text{К}} \cdot t_p = 3\,950 \cdot 8760 \approx 34\,602$ (кВт/год)

Экономический эффект от снижения мощности потерь в проводах:

$$\Delta C_2 = c_w \cdot \Delta P_{0, \text{К.ГОД}} = 69\,204 \text{ р.}$$

Итого, суммарный экономический эффект от снижения всех потерь:

$$\Sigma C = \Delta C_1 + \Delta C_2 = 69\,196 + 69\,204 = 138\,400 \text{ р.}$$

8. Расходы на компенсаторные элементы и срок окупаемости

Для компенсации реактивно-емкостной мощности в схему будут установлены параллельно - дроссельные компенсаторы типа ДК-0,7 в кол-ве $n = 100$ шт.

Стандартные дроссельные компенсаторы ДК-0,7-400-400 имеют параметры:

$J = 400$ А и $U = 400$ В. Их целесообразно объединить: || 10 блоков по 10 шт.

Например, при стоимости $c_{w, L} = 1000$ р./1 шт. ДК-0,7 общие затраты составят:

$$\Delta C_{w, L} = c_{w, L} \cdot n = 1000 \cdot 100 = 100\,000 \text{ р.}$$

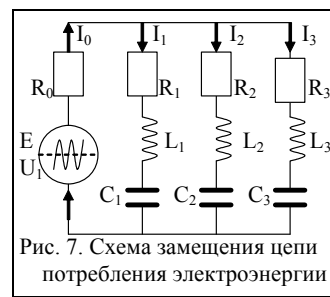
Срок окупаемости: $T_{\text{ОК}} = \Delta C_{w, L} / \Sigma C = 100\,000 \text{ р} / 138\,400 \text{ р} \approx 0,72$ года.

• По данной теме студенты выполняют КГР № 1

КГР 1. Выполнить расчет параметров схемы, используя данные из таблицы №7.

Таблица № 7.1. КГР 1 – Схема и параметры энергосистемы предприятия (условно)

$R_0 = \text{Ом}$ *	$P_0 = \text{Вт}$ *	$S_0 = \text{ВА}$ *	$I_0 = \text{А}$ *	$I_{0, \text{А}} = \text{А}$ *	$I_{0, \text{Р}} = \text{А}$ *
$R_1 = \text{Ом}$ *	$L_1 = \text{Гн}$ *	$C_1 = \text{мкФ}$ *	$I_1 = \text{А}$ *	$I_{1, \text{А}} = \text{А}$ *	$I_{1, \text{Р}} = \text{А}$ *
$R_2 = \text{Ом}$ *	$L_2 = \text{Гн}$ *	$C_2 = \text{мкФ}$ *	$I_2 = \text{А}$ *	$I_{2, \text{А}} = \text{А}$ *	$I_{2, \text{Р}} = \text{А}$ *
$R_3 = \text{Ом}$ *	$L_3 = \text{Гн}$ *	$C_3 = \text{мкФ}$ *	$I_3 = \text{А}$ *	$I_{3, \text{А}} = \text{А}$ *	$I_{3, \text{Р}} = \text{А}$ *
$U_0 = \text{В}$ *	$L_{\text{КОМ}} =$ *	$C_{\text{КОМ}} =$ *	$P_{\text{К}} = \text{Вт}$ *	$Q_{\text{К}} = \text{Вар}$ *	$S_{\text{К}} = \text{ВА}$ *



Рекомендуемая литература:

1. Рекус Г.Г. Основы электротехники и промышленной электроники в примерах и задачах с решениями: Учебное пособие. – М.: Высш. шк., 2008. – 343 с.
2. Сборник задач по электротехнике и основам электроники / Под ред. В.Г. Герасимова. – М.: Высш. шк., 1987. – 288 с.
3. Березкина Т.Ф., Гусев Н.Г. Задачник по общей электротехнике с основами электроники. – М.: Высш. шк., 1983. – 368 с.

Задание для контрольно-графической работы – КГР № 1

Варианты 1-48. По заданной векторной диаграмме для цепи переменного тока с последовательным соединением элементов R, L, C начертить эквивалентную схему цепи и определить следующие величины:

- 1) сопротивление каждого элемента (R, X_L, X_C) и полное сопротивление цепи $Z_{\text{ц}}$;
- 2) напряжение E , приложенное к цепи; 3) угол сдвига фаз ϕ (по величине и знаку); 4) активную, реактивную и полную мощности (P, Q, S) цепи.

С помощью логических рассуждений пояснить характер доминирующей нагрузки в цепи и способ компенсации реактивной мощности.

Данные для своего варианта записать из таблицы №7.2.

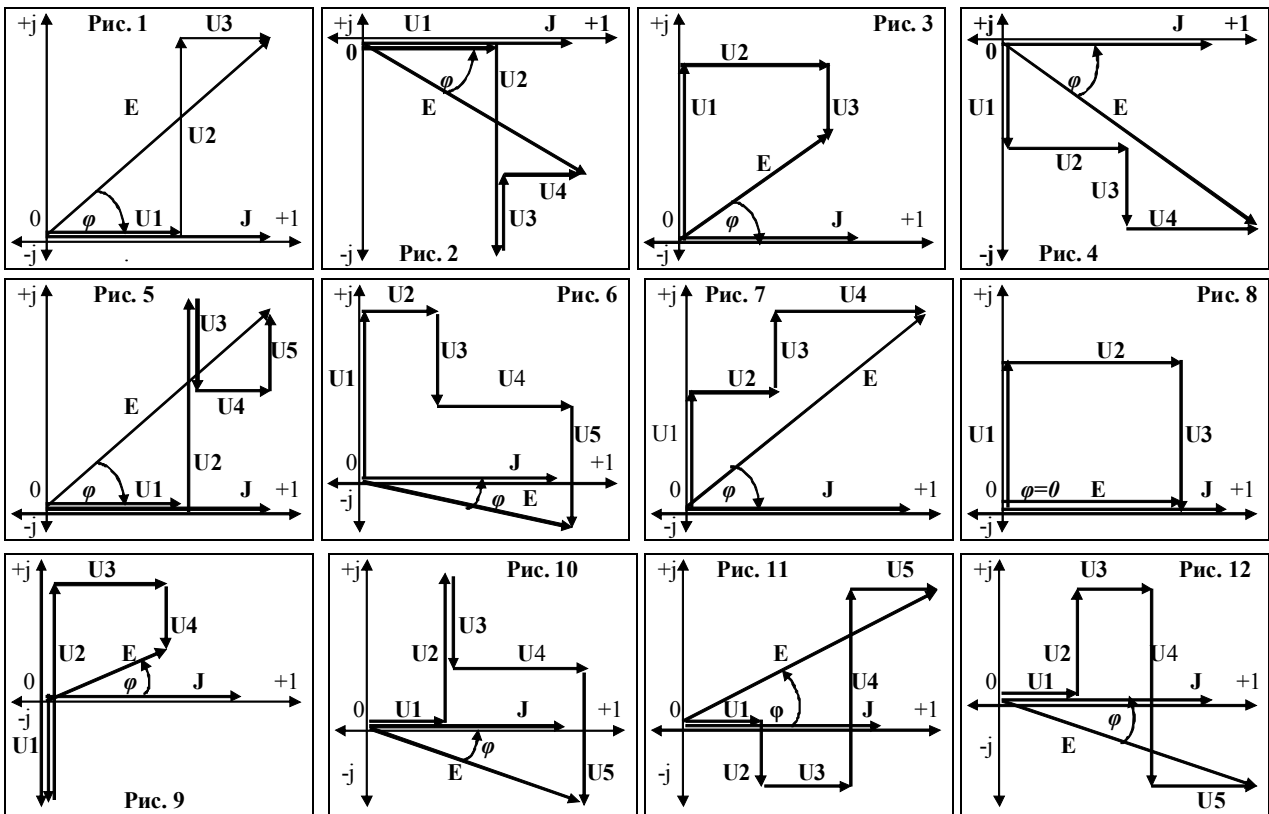


Таблица 7.2.

№ вар	№ рис	I, A	U ₁ , B	U ₂ , B	U ₃ , B	U ₄ , B	U ₅ , B	R _э , Ом	X _{Лэ} , Ом	X _{Сэ} , Ом	Z _ц , Ом	E _м , В	P, Вт	Q, ВАР	S, ВА	Cos φ гр.
01	01	1,6	14	30	10	-	-									
02	02	1,2	20	30	10	10	-									
03	03	0,64	6	6	3	-	-									
04	04	2	5	6	5	6	-									
05	05	4	8	12	4	4	5									
06	06	2	10	4	6	10	6									
07	07	3	9	5	5	8	-									
08	08	5	15	20	15	-	-									
09	09	4	12	24	12	8	-									
10	10	10	10	20	10	20	20									
11	11	3	6	4	6	12	4									
12	12	2	8	10	8	20	8									
13	01	6	20	40	15	-	-									
14	02	7	10	15	8	8	-									
15	03	5	10	10	5	-	-									
16	04	3	12	15	12	15	-									
17	05	6	8	12	4	4	4									
18	06	4	20	8	12	20	12									
19	07	3	5	2,5	2,5	8	-									
20	08	5	12	15	12	-	-									
21	09	2	8	16	8	6	-									
22	10	4	10	20	10	20	20									
23	11	3	8	6	8	16	6									
24	12	5	5	8	5	10	5									
25	01	2	12	24	8	-	-									
26	02	3	10	15	5	5	-									
27	03	4	8	8	4	-	-									
28	04	5	15	12	15	18	-									
29	05	1	12	16	6	6	8									
30	06	8	20	14	16	20	12									
31	07	4	18	10	10	16	-									
32	08	5	5	12	5	-	-									
33	09	2	20	40	20	16	-									
34	10	3	6	12	6	12	12									
35	11	4	16	10	16	24	8									
36	12	5	18	20	18	30	16									
37	01	8	10	20	8	-	-									
38	02	6	12	16	10	10	-									
39	03	2	30	30	15	-	-									
40	04	3	24	30	24	30	-									
41	05	4	4	6	2	2	2									
42	06	8	8	4	6	8	6									
43	07	5	15	7,5	7,5	24	-									
44	08	5	10	16	10	-	-									
45	09	2	16	32	16	12	-									

Задание для контрольно-графической работы – КГР № 3

Вариант 01–48. Цепь переменного тока содержит элементы R,L,C, образующие две параллельные ветви. Схема цепи приведена на соответствующем рисунке. Значения всех сопротивлений на схемах, а также дополнительный параметр заданы в табл. 7.3. Начертить векторную диаграмму цепи и определить величины: I_0, I_1 и $I_2; E, P, Q$ и S .

1) Объяснить, каким образом в заданной цепи можно получить резонанс, т.е. добавить или изъять элемент, либо увеличить/уменьшить величину этого элемента.

Рисунки схем для контрольно-графической работы – КГР № 3

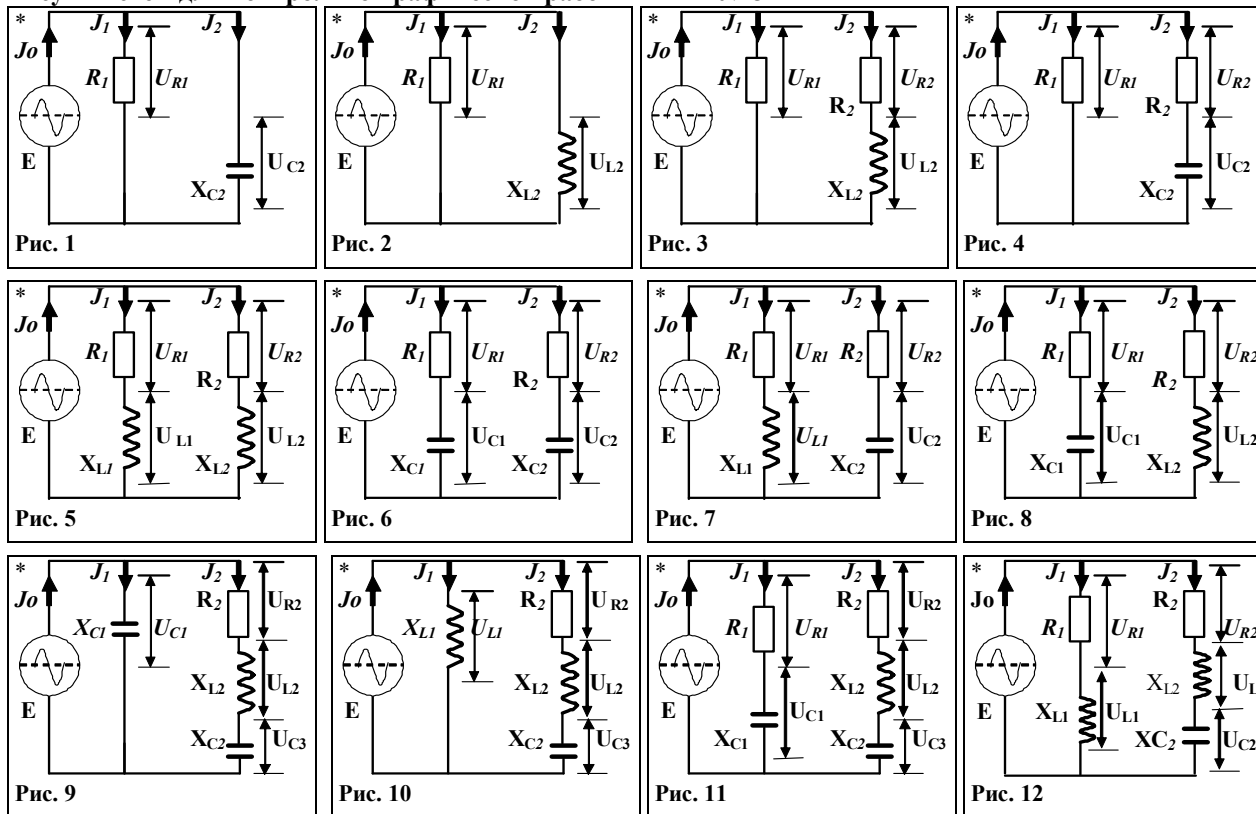


Таблица 7.3.

№ вар	№ рис	R1, Ом	R2, Ом	XL1, Ом	XL2, Ом	XC1, Ом	XC2, Ом	Дополнит. параметр
01	26	5	3	-	4	6	-	$Q = 64 \text{ ВА}_P$
02	27	10	8	-	-	12	6	$E = 20 \text{ В}$
03	28	4	-	9	5	-	5	$I_1 = 5 \text{ А}$
04	29	4	6	3	8	-	-	$I_2 = 4 \text{ А}$
05	30	16	-	12	-	-	10	$P = 256 \text{ Вт}$
06	31	24	16	-	12	32	-	$E = 80 \text{ В}$
07	32	5	4	-	6	-	-	$I_2 = 6 \text{ А}$
08	33	15	12	6	20	-	4	$P_1 = 240 \text{ Вт}$
09	34	8	16	-	-	6	12	$U_L = 100 \text{ В}$
10	35	4	8	-	12	3	6	$P_2 = 288 \text{ Вт}$
11	26	10	6	-	8	4	-	$E = 50 \text{ В}$
12	27	2	3	12	-	6	4	$I_1 = 5 \text{ А}$
13	28	12	-	4	22	13	8	$I_2 = 6 \text{ А}$
14	29	6	3	8	4	-	-	$P_2 = 300 \text{ Вт}$
15	30	32	-	24	-	-	40	$E = 120 \text{ В}$
16	31	12	8	-	10	16	-	$Q_{L2} = 250 \text{ ВА}_P$
17	32	2	2	9	3	-	5	$P_2 = 16 \text{ Вт}$
18	33	5	8	-	4	-	10	$E = 30 \text{ В}$
19	34	3	6	-	-	4	3	$I_2 = 1 \text{ А}$
20	35	8	4	-	5	5	8	$E = 20 \text{ В}$
21	26	4	4	10	3	-	-	$I_1 = 8 \text{ А}$
22	27	5	4	-	6	12	3	$I_2 = 2 \text{ А}$
23	28	2	-	8	-	15	4	$E = 8 \text{ В}$
24	29	8	12	6	16	-	-	$Q_2 = 144 \text{ ВА}_P$
25	30	48	-	64	10	21	60	$U_{R1} = 144 \text{ В}$
26	31	3	8	-	6	4	5	$I_1 = 5 \text{ А}$
27	32	6	3	-	8	33	-	$Q = 72 \text{ ВА}_P$
28	33	10	6	-	12	-	4	$Q = 32 \text{ ВА}_P$
29	34	24	12	-	-	32	16	$E = 120 \text{ В}$
30	35	32	24	33	-	-	36	$E = 220 \text{ В}$

Оценка параметров однофазных трансформаторов (6)

Пример 1. Выполнить сопоставимый расчет параметров трансформаторов из магнитопроводом 2-х типов: ПЛВ – (листовой, витой) и ПЛ – (листовой) (рис. 8.1).

На рис. 8.1,а показан П-образный магнитопровод ПЛ из пластин горячекатанной ст.1511, с 4-мя зазорами $\delta_{вз} = 0,10$ (мм); [опт. условие: $b = \sqrt{S/2}$; $h = S/b$].

На рис.8.1,б показан С-образный витой ленточный магнитопровод ПЛВ из холоднокатанной ст.3412, из двух половин с 2-мя зазорами $\delta_{вз} = 0,02$ (мм).

$w_1=130$	$U_1=220$	$I_1=45,5$	$P_1=10$ кВт	$w_1=130$	$\varnothing_1=4,25$	$I_{1X}=2,86$	$I_{1X,\Delta}=0,175$	$I_{1X,P}=2,82$
$w_2=26$	$U_2=44$	$I_2=225A$	$P_2=9,1$ кВт	$w_2=26$	$\varnothing_2=9,15$	$k_{3C}=0,92$	$k_{3O}=0,28$	$cos\phi=0,06$
Ст. 2211	$B_m=1,51$	$H=5A/cm$	$\Phi_m=0,0076$	$\eta=0,92$	$G_C=27,4$	$P_{Fe}=38,5$	$P_{Cu}=$	$Q_C=562$ вар
ПЛВ:[М]	$a=0,07$ м	$b=0,05$ м	$c=0,11$ м	$h=0,2$ м	$l_{CP}=0,697$	$\delta_{вз}=20$ мкм	$S_C=0,0505$	$S_{OK}=0,014$

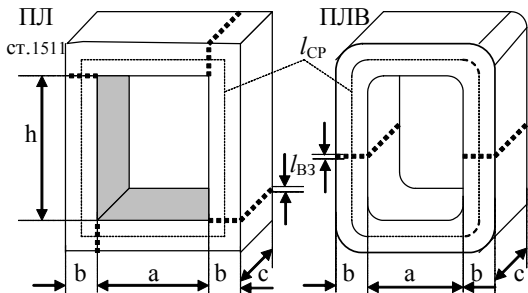


Рис. 8.1. Магнитопроводы трансформаторов ПЛ и ПЛВ

Активными сопротивлениями обмоток и полем рассеяния можно пренебречь.

Определить: активные и реактивные токи и мощность; потери в сердечнике; вес G магнитопровода; коэфф. мощности и тангенс угла потерь;

Часть 1. Пример решения для сердечника марки ПЛВ (см. табл. 8.1):

- 1) Коэфф. трансформации: $n = U_1/U_2 = I_2/I_1 = w_1/w_2 = 220/44 = 130/26 = 5$.
- 2) Определим габаритную мощность P_1 трансформатора по входным параметрам:
 $P_1 = U_1 \cdot I_1 = 220 \cdot 45,5 = 10000$ (Вт). * [грубо для P от 50 до 1000 Вт $S_C = \sqrt{P_1}$].
- 3) Определим мощность P_2 в нагрузке по выходным параметрам, с учетом КПД:
 $P_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \eta = 44 \cdot 225 \cdot 0,92 = 10000 \cdot 0,92 = 9100$ (Вт).
- 4) Определим площадь сечения S_C сердечника (ПЛВ) и площадь окна S_{OK} :
 $S_C = k_{TP} \cdot \sqrt{P \cdot \eta / 2 \cdot f} \cdot 0,0001 = 5,3 \sqrt{10000 \cdot 0,92 / 100} \cdot 0,0001 = 0,00508$ (м²).
* Сечение по габар. размерам: $S_C = b \cdot c \cdot k_{3,C} = 5 \cdot 11 \cdot 0,92 = 50,5$ (см²) = 0,00505 (м²).
 $S_{OK} = (2 \cdot w_1 \cdot I_{1H}) / (j \cdot K_{3,O})$. $S_{OK} = (2 \cdot 130 \cdot 45) / (3,0 \cdot 10^6 \cdot 0,28) = 0,014$ (м²) = (h*a).
- где: $k_{TP} = (5 \div 6)$ – коэфф. при воздушном охлаждении трансформатора ($k_{TP} = 5,3$).
 $k_{3,O} = (0,25 \div 0,33)$ - коэффициент заполнения окна; примем ($k_{3,O} = 0,28$).
- 5) При номинальных напряжениях обмоток w_1 и w_2 в магнитопроводе создается один и тот же магнитный поток, т.е. $\Phi_{m1} = \Phi_{m2}$; поэтому при $\Phi_m = U_m / (\omega \cdot w)$
получим: $\Phi_{m1} = U_{m1} / (\omega \cdot w_1) = \Phi_{m2} = U_{m2} / (\omega \cdot w_2) = \sqrt{2} \cdot U / (2 \cdot \pi \cdot f \cdot w) = U / (4,44 \cdot f \cdot w)$.
 $\Phi_{m1} = U_{1,ном} / (4,44 \cdot f \cdot w_1) = U_{2,ном} / (4,44 \cdot f \cdot w_2) = 0,00762$ (Вб).
- 6) Магнитная индукция в магнитопроводе: $B_m = \Phi_m / S_C = 0,00762 / 0,00505 = 1,51$.
 $B_m = U_1 / (4,44 \cdot f \cdot w_1 \cdot S_C) = 220 / (4,44 \cdot 50 \cdot 130 \cdot 0,00505) \approx 1,51$ Тл.
Для марки ст. 3412 приемлема индукция в диапазоне $B_m = 1 \div 1,7$ Тл.
* если вып. условие $w'_1 = 220$, то $B_m' = 220 / (4,44 \cdot 50 \cdot 220 \cdot 0,00505) = 0,89$ Тл.
* B_m' - недостаточна, следовательно, число витков w'_1 уменьшено до $w_1 = 130$.
- 7) Проверим мощность вторичной обмотки ПЛВ трансформатора:
 $P_2 = (1/2) \cdot (B_m / \sqrt{2}) \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot j \cdot (S_C \cdot k_{3,C}) \cdot (S_{OK} \cdot k_{3,OK}) =$
 $= (1/2) \cdot 1,51 \cdot 4,44 \cdot 50 \cdot (3,0 \cdot 10^6) \cdot (0,00505 \cdot 0,92) \cdot (0,014 \cdot 0,28) = 9157$ (ВА).
- где: j – плотность тока в обмотке 3 (А/мм²) = $3,0 \cdot 10^6$ (А/м²).
- 8) По кривой намагничивания (для ст.3412 при $f = 50$ Гц) находим действующее значение напряженности H_C магнитного поля в стали: $H_C = 5$ (А/см) = 500 (А/м).
- 9) Действующее значение напряженности магнитного поля в воздушном зазоре магнитопровода составит:
 $H_B = B_m / (\mu_0 \cdot \sqrt{2}) = 1,51 / (1,41 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}) =$
 $= 8 \cdot 10^5 \cdot (1,51 / 1,41) = 8,56 \cdot 10^5$ (А/м) = 856 000 (А/м) = 8560 (А/см).
- где $(\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}) = (0,125 \cdot 10^{-5})$ (Гн/м) – магнитная проницаемость вакуума.
- 10) Магнитодвижущую (намагничивающую) силу ($\theta = I \cdot w$) в режиме холостого хода трансформатора находят по закону полного тока (для действующего тока):

$$\theta = I_{1X} \cdot w_1 [A]; \quad H_C = I_1 \cdot w_1 / l_{CP}. \quad \theta = w_1 \cdot I_{1X} = H_C \cdot l_{CP} + H_{B,3} \cdot l_{B,3}$$

Где – l_{CP} - длина средней линии магнитопровода: $l_{CP} = 2h + 2a + \pi b = 69,7$ (см).

Длина по двум воздушным зазорам составит: $l_{B,3} = 2 \cdot \delta = 2 \cdot 0,002 \text{ см} = 0,004 \text{ см}$.

Тогда, $\theta = 5(\text{А/см}) \cdot 69,7(\text{см}^2) + 8560(\text{А/см}) \cdot 0,004(\text{см}) = 382,7 (\text{А})$.

* При отсутствии зазора в магнитопроводе: $\theta' = w_1 \cdot I_{1,X} = H_C \cdot l_{CP} = 348,5 (\text{А}')$.

11) Ток ХХ составит: $I_{1,X} = (H_C \cdot l_{CP} + H_{B,3} \cdot l_{B,3}) / w_1$; $I_{1,X} = \theta / w_1 = 383 / 130 = 2,94 (\text{А})$.

12) Диаметр провода обмотки w_1 и w_2 на ном. мощн., при: $U_2 = 44 \text{ В}$; $I_2 = 225 (\text{А})$.

$$\varnothing_{\text{пр},w_1} = 0,02 \cdot \sqrt{I_1(\text{мА})} = 0,02 \cdot \sqrt{(45000 \text{ мА})} = 4,25 (\text{мм});$$

$$\varnothing_{\text{пр},w_2} = 0,02 \cdot \sqrt{I_2(\text{мА})} = 0,02 \cdot \sqrt{(225000 \text{ мА})} = 9,15 (\text{мм}).$$

Проводя аналогичный расчет для трансформатора ПЛ, получим:

при $l_{CP} = 74 (\text{см})$, $l_{B,3} = 0,01 (\text{см})$, получим: $H_C = 14,6 (\text{А/см})$, $\theta = 1152 (\text{А})$, $I_{1,X} = 8 (\text{А})$.

Часть 2. Найдем составляющие активных и реактивных токов $I_{1,X,A}$, $I_{1,X,P}$; $\cos \varphi_0$ и углы сдвига фаз (α) между потоком и током в режиме ХХ.

1) Активная составляющая тока определяется мощностью потерь: $P_{Fe} = P_0 \cdot G_C$.

а) Масса сердечника: $G_C = \gamma_C \cdot l_C \cdot S_C = 7,8 \cdot 69,7 \cdot 50,5 = 27 450 \text{ гр.} = 27,4 (\text{кг})$.

б) для индукции $B_m = 1,51 \text{ Тл}$ удельные потери P_{Fe} составят: $P_0 = 1,4 (\text{Вт/кг})$.

Мощность потерь в сердечнике составит: $P_{Fe} = 1,4 \cdot 27,4 = 38,5 (\text{Вт})$.

Активная составляющая тока $I_{1,X,A}$: $I_{1,X,A} = P_C / U = 38,5 / 220 = 0,175 (\text{А})$.

2) Реактивная намагничивающая мощность: $Q_C = Q_0 \cdot G_C = 20,5 \cdot 27,4 = 562 [\text{ВАР}]$.

3) Реактивная мощность, затрачиваемая на создание поля в зазорах сердечника: $Q_{B,3} = Q_{o.B,3} \cdot V_{B,3}$.

где: $Q_{o.B,3} = \omega \cdot H_{B,3} \cdot B_{B,3} / 2 = \omega \cdot B_{B,3}^2 / (2 \cdot \mu_0)$ - удельная реактивная мощность;

$$Q_{o.B,3} = 314 \cdot 1,51^2 / (2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}) = 2,89 \cdot 10^8 [\text{ВАр/м}^3].$$

$V_{B,3}$ - объем воздушных зазоров: $V_{B,3} = S_C \cdot l_{B,3} = 50,5 \cdot 0,004 = 0,202 \text{ см}^3 = 0,2 \cdot 10^{-6} (\text{м}^3)$.

Следовательно, $Q_{B,3} = (2,86 \cdot 10^8) \cdot (0,2 \cdot 10^{-6}) = 57,2 (\text{Вар})$.

5) Реактивная составляющая тока холостого хода трансформатора

$$I_{1,X,P} = (Q_C + Q_{B,3}) / U = (562 + 57,2) / 220 = 2,82 (\text{А}).$$

6) Ток холостого хода составит: $I_{1,X} = \sqrt{I_{1,X,A}^2 + I_{1,X,P}^2} = \sqrt{0,175^2 + 2,82^2} = 2,86 (\text{А})$.

7) Коэфф. мощности: $\cos \varphi_0 = I_{1,X,A} / I_{1,X} = 0,175 / 2,86 = 0,061$.

8) Тангенс угла потерь: $\text{tg } \alpha = I_{1,X,A} / I_{1,X,P} = 0,175 / 2,82 = 0,062$; $\alpha = 3^\circ 30'$.

Соотношение токов определяется равенством МДС обмоток в режиме ХХ:

$$w_1 \cdot I_{1,X} = w_2 \cdot I_{2,X}, \text{ т.е. } I_{2,X} = I_{1,X} \cdot (w_1 / w_2) = n \cdot I_{1,X} = 5 \cdot 2,86 = 14,4 (\text{А}).$$

Аналогичный расчет для трансформатора типа - ПЛ дал: $I_{1,X} = 8 \text{ А}$; $\cos \varphi_0 = 0,046$.

График зависимости числа витков w_1 первичной обмотки трансформатора типа ШЛ и ПЛ от мощности трансформатора $P_{\text{ТР}}$ приведен на рис. 8.2.

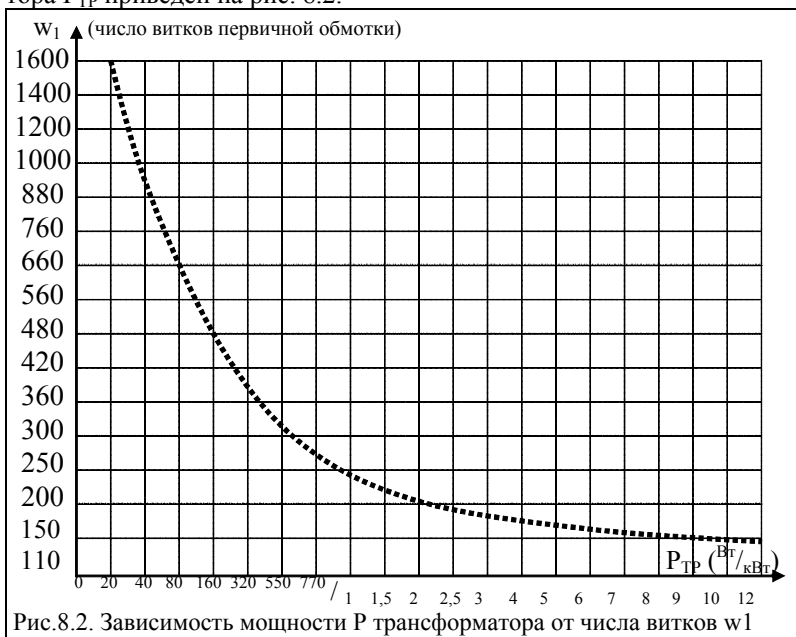
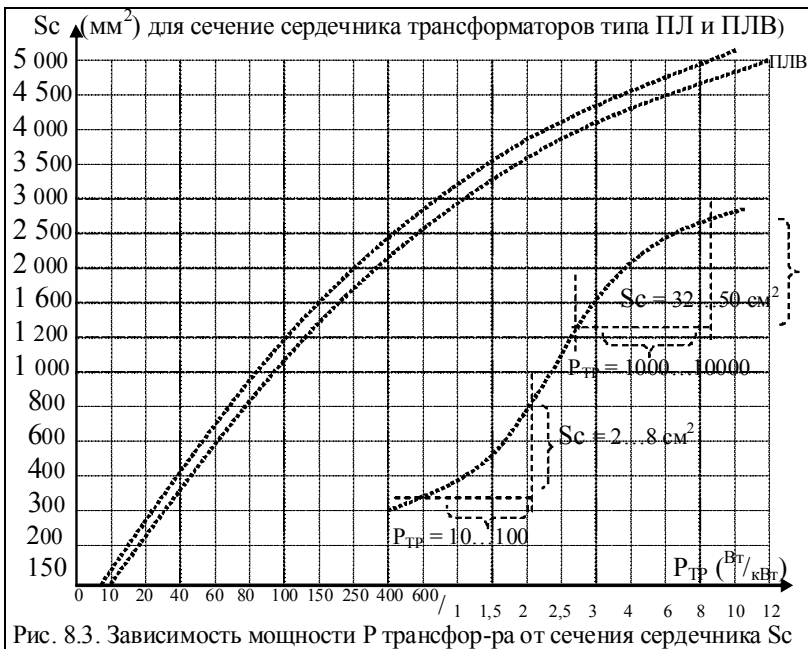


Рис.8.2. Зависимость мощности трансформатора от числа витков w_1

График зависимости сечения сердечника магнитопровода S_C трансформатора от мощности трансформатора $P_{\text{ТР}}$ приведен на рис. 8.3.



• По данной теме студенты выполняют КГР № 4.

При проведении КГР студенту выдается задание - карточка (таблица № 8.2), в которой, при расчете, необходимо заполнить оставшиеся свободные клетки.

Таблица №8.2. КГР – расчет параметров трансформатора (2 ч.)

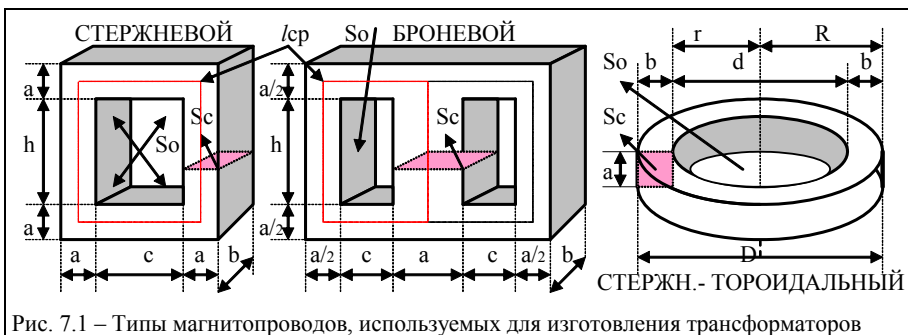
КГР № 2 ФИО: _____		Группа: _____		Вар.: _____		Дата: _____	
Вычислить параметры однофазного сетевого трансформатора с двумя обмотками							
$v_1 = 660$	$U_1 = 220$	$I_1 = 2 \text{ A}$	$P_1 =$	$w_1 =$	$\varnothing_1 =$	$I_{IX} =$	$I_{IXA} =$
$w_2 =$	$U_2 = 22$	$I_2 = 20 \text{ A}$	$P_2 =$	$w_2 =$	$\varnothing_2 =$	$k_{3C} = 0,92$	$k_{3O} = 0,28$
Ст. 2211	$B_m =$	$H =$	$\Phi_m =$	$\eta = 0,92$	$G_C =$	$P_{Fe} =$	$P_{Cu} =$
ПЛВ: [м]	$a = 0,0 \text{ м}$	$b = 0,0 \text{ м}$	$c = 0, \text{ м}$	$h = 0, \text{ м}$	$l_{CP} =$	$\delta_{B3} = 20 \text{ мкм}$	$S_C =$

* При расчете можно использовать табличные (справ.) значения удельных активных (P_o) и реактивных (Q_o) потерь и зависимость $B = f(H)$ кривой намагничивания для данной стали.

Рекомендуемая литература

1. Рекус Г.Г. Основы электротехники и промышленной электроники в примерах и задачах с решениями: Учебное пособие. – М.: Высш. шк., 2008. – 343 с.
2. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. – М.: Высш. шк., 2003. – 540 с.
3. Алиев И.И. Электротехнический справочник. – М.: Радио, 2000. – 384 с.
4. Сборник задач по электротехнике и основам электроники / Под ред. В.Г. Герасимова. – М.: Высш. шк., 1987. – 288 с.
5. Березкина Т.Ф., Гусев Н.Г. Задачник по общей электротехнике с основами электроники. – М.: Высш. шк., 1983. – 368 с.

Пример 2. Расчет параметров броневой трансформатора мощностью 24 Вт



Параметры магнитопровода (ферромагнетика, железа) Ш19х30: $w = 1800$ вит.;

$b = 12$ мм - ширина окна; $h = 33,5$ мм – высота окна; $d_{TP} = 0,8$ мм;

$J_m = 10,2$ см (102 мм; 0,102м) - эффективная длина магнитной линии;

$S_C = a \cdot c = 19 \cdot 30 = 570 \text{ мм}^2 = 5,7 \text{ см}^2$; $K_{3C} = 0,26$

$S_O = b \cdot h = 12 \cdot 33,5 = 402 \text{ мм}^2 = 4,02 \text{ см}^2$;

$J = d^2 / 0,8 = 0,8 \text{ A}$. $S_{TP} = 0,5 \text{ мм}^2$; $J_{PAC} = 1 \dots 3 \text{ A}$ при $j = 2 \dots 4 \text{ (A/мм}^2)$;

При $j = 2 \text{ A/мм}^2$: $I = 1 \text{ A}$ (тогда $L = 1,64 \text{ Гн}$); При $j = 4 \text{ A/мм}^2$: $I = 2 \text{ A}$ (тогда $L = 0,82 \text{ Гн}$).

$P_T = B_m \cdot S_C / 1,69$; пусть $B_m = 1,25$, тогда: $P_T = 1,25 \cdot 5,7^2 / 1,69 = 24 \text{ (Вт)}$.

Проверка условия: $S_o * S_c = 4,02 * 5,7 = 22,8$ (Вт).

$$I_{B3} = I * w / (796 * B_m) = 0,8 * 1800 / (798 * 1,25) = 1,44 \text{ (мм)}$$

$$L = \mu_o * S_c * K_{3c} * w^2 / I_{B3} = 1,25 * 10^{-7} * 5,7 * 0,26 * 1800^2 / 1,44 = 1,6 \text{ (Гн)}$$

Потокоцепление $\psi = L * I = 1,6 * 0,8 = 1,2825$ (.) Магнитный поток одного витка $\Phi = \psi / w = 1,2825 / 1800 = 0,0007125$ (вб)

$$W = (100 * S_o * K_{3o} * J) / I = (18.10) \quad \Phi = w * B_m * S_c * K_{3c} * 10^{-4}$$

Подставив 18.10 в 18.11 получим:

$$\Phi * W = (0,01 * B_m * j * S_c * S_o * K_{3c} * K_{3o}) / I =$$

Известно, что $\Phi * W = L * I$ Из 18.12 и 18.13 найдем индуктивность

$$L = (0,01 * S_c * S_o * B_m * j * K_{3c} * K_{3o}) / I^2$$

$$S_c * S_o = (100 * L * I^2) / (B_m * j * K_{3o} * K_{3c}) \text{ (см}^2\text{)} \quad P_{ГЛАБ} = 1,25 * S_c * S_o$$

$$I_{B3} = I * w / (798 * B_m) \text{ (мм)} \quad (18.16) \quad I = 798 * B_m * I_{B3} / W \text{ (А)}$$

$$P_{ПОТ.ФЕ} = P_{УД} * G_c (B_m / B_y)^{\beta} * (f / f_y)^{\alpha}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ.П1

Справочные данные для РГР № 4 - №8

Таблица П1. Значение тригонометрических функций

Значение угла для тригоном. функций					Значение угла для тригонометр. функций						
№	Функ	Sin (60)	Cos (60)	tg (60)	Прим.	№	Функ	Sin (60)	Cos (60)	tg (60)	Прим.
1	0,05	2°52	87°08	2°52		41	0,71	45°14	44°45	35°22'30	
2	0,07	4°00	86°00	4°00		42	0,72	46°03	43°57	35°45	
3	0,10	5°44	84°16	5°43		43	0,74	47°44	42°16	36°30	
4	0,12	6°53'30	83°06	6°50'30		44	0,75	45°35	41°24'30	<u>36°52</u>	
5	0,14	8°03	81°57	7°58		45	0,76	49°28	40°32	37°14	
6	0,15	9°12	80°48	9°05		46	0,78	51°16	38°44	37°57	
7	0,16	9°12	80°48	9°05		47	0,80	53°08	36°52	38°39	
8	0,18	10°22	79°38	10°12		48	0,82	55°05	34°55	39°21	
9	0,20	<u>11°32</u>	<u>78°28</u>	<u>11°19</u>		49	0,84	57°08	32°52	41°40	
10	0,22	12°42'30	77°17	12°24		50	0,85	58°13	31°47	40°21	
11	0,24	13°53	76°07	13°29		51	0,86	59°19	30°41	40°41	
12	<u>0,25</u>	<u>14°29</u>	<u>75°31</u>	<u>14°02</u>		52	0,866	60°00	30°00	40°53	Sin = √3/2
13	0,26	15°04	74°56	14°34		53	0,88	61°38'30	28°21	41°20	
14	0,28	16°15'30	73°44	15°38		54	0,90	64°09'30	25°50'30	41°59	
15	0,30	17°27	72°32'30	16°41		55	0,92	66°55'30	23°04	42°36	
16	<u>0,32</u>	<u>18°40</u>	<u>71°20</u>	<u>17°44</u>		56	0,94	70°03	19°57	43°13	
17	0,34	19°52'30	70°07	18°46		57	0,95	71°48	18°12	43°31	
18	0,35	<u>20°29</u>	<u>69°31</u>	<u>21°48</u>		58	0,96	73°44	16°16	43°49	
19	0,36	21°06	68°54	19°47		59	0,98	78°31	11°29	44°25	
20	<u>0,38</u>	<u>22°20</u>	<u>67°40</u>	<u>20°48</u>		60	0,99	81°53	08°06'30	44°42	
21	0,40	<u>23°35</u>	<u>66°25</u>	<u>21°48</u>		61	1,00	90°	0°	45°00	
22	<u>0,42</u>	<u>24°50</u>	<u>65°10</u>	<u>22°44</u>		62	1,25	–	–	51°20	
23	0,44	26°06	63°54	23°44		63	1,50	–	–	56°18	
24	0,45	26°44'30	63°15	24°13		64	1,75	–	–	59°35	
25	0,46	27°23	62°37	24°42		65	2,00	–	–	63°26	
26	<u>0,48</u>	<u>28°41</u>	<u>61°19</u>	<u>25°38</u>		66	2,25	–	–	66°02	
27	0,50	30°00	60°00	26°34	Sin = 1/2	67	2,50	–	–	68°11	
28	0,52	<u>31°20</u>	<u>58°40</u>	<u>27°28</u>		68	2,75	–	–	70°01	
29	0,54	<u>32°41</u>	<u>57°19</u>	<u>28°22</u>		69	3,00	–	–	71°33	
30	0,55	33°22	56°38	28°48		70	3,50	–	–	74°03	
31	0,56	34°03	55°57	29°14		71	4,00	–	–	75°57	
32	0,58	35°27	54°33	30°06		72	4,5	–	–	77°28	
33	0,60	<u>36°52</u>	<u>53°08</u>	<u>30°58</u>		73	5,0	–	–	78°41	
34	0,62	38°19	51°41	31°48		74	6,0	–	–	80°32	
35	0,64	39°47'30	50°12'30	32°37		75	7,0	–	–	81°52	
36	0,65	40°32'30	49°27'30	33°01		76	8,0	–	–	82°52	
37	0,66	41°18	48°42'00	33°25'30		77	9,0	–	–	83°39	
38	0,68	42°51	47°09	34°13		78	10,0	–	–	84°17	
39	0,70	44°26	45°34	34°59'30		79	15,0	–	–	86°11	
40	0,707	<u>45°00</u>	<u>45°00</u>	<u>35°15'30</u>	Sin=√2/2	80	25,0	–	–	87°42	