Энгельсский технологический институт (филиал) федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А.»

Кафедра «Естественные и математические науки»

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Методические указания к практическим занятиям
и выполнению контрольной работы
для студентов направлений

09.03.01 «Информатика и вычислительная техника»
09.03.04 «Программная инженерия»
15.03.02 «Технологические машины и оборудование»
15.03.05 «Конструкторско-технологическоеобеспечение машиностроительных производств»
18.03.01 «Химическая технология»
23.03.01 «Нефтегазовое дело»
29.03.05 «Конструирование изделий легкой промышленности»

заочной формы обучения

Энгельс 2025

ВВЕДЕНИЕ

Настоящие методические указания предназначены для студентов заочной формы обучения, выполняющих самостоятельно, в процессе обучения, контрольные задания по курсу «Электротехника и электроника». На типовых задачах подробно показан ход выполнения задания с привлечением кратких теоретических сведений, поясняющих решение. Приведены варианты контрольных заданий.

Содержание каждой контрольной работы для каждой специальности определяет ведущий преподаватель. Варианты каждого задания определяются по последним цифрам зачетной книжки. Если в задании 10 вариантов, то по последней цифре, если 50, то по двум последним цифрам. Студенты, у которых номера зачетной книжки с 51 по 100 выполняют варианты заданий с 1 по 50.

ПРОГРАММА

Введение. Электрическая энергия, ее особенности и области применения. Краткая историческая справка. Традиционные и альтернативные источники электрической энергии. Роль электротехники и электроники в развитии комплексной автоматизации современных технологических и производственных процессов и систем управления.

Линейные электрические цепи постоянного тока (ЦПТ).

Электротехнические устройства постоянного тока и их области применения. Элементы электрической цепи. Источники и приемники электрической энергии. Их условные графические и позиционные обозначения на электрических схемах. Принципиальные электрические схемы. Схемы замещения электротехнических устройств. Идеальные элементы ЦПТ.

Топологические понятия теории электрических цепей: ветвь; узел; контур; независимый контур. Условные положительные направления электрических величин: эдс; тока; напряжения. Основные законы электрической цепи: Ома; Кирхгофа. Уравнение баланса мощностей. Режимы работы электрической цепи. Расчет простых цепей: цели; последовательное и параллельное соединение элементов электрической цепи. Расчет сложных электрических цепей. Методы. Метод контурных токов.

Однофазные цепи. Электротехнические устройства переменного тока. Причины их широкого распространения. Идеальные элементы цепи переменного тока. Основные параметры синусоидального тока: мгновенные; амплитудные; средние; действующие значения переменных величин. Период и частота переменного тока. Способы представления

синусоидальных функций: волновыми диаграммами; векторами; комплексными числами.

Цепь с резистором. Цепь с идеальной индуктивностью. Цепь с идеальной емкостью. Цепь с последовательным соединением R, L, C. Комплексы полного сопротивления и проводимости. Комплекс полной мощности.

Цепи с параллельными ветвями. Расчет методом активных и реактивных токов. Резонансные явления в электрических цепях. Повышение коэффициента мощности электроустановок.

Трехфазные цепи. Преимущества трехфазных цепей. Трехфазный генератор.

Соединение фаз в звезду. Четырехпроводная цепь: фазные и линейные напряжения и токи. Соотношения между ними. Векторные диаграммы напряжений токов. Роль нулевого провода.

Соединение фаз в треугольник. Соотношения между фазными и линейными токами и напряжениями.

Мощность трехфазной цепи при симметричной и несимметричной нагрузке. Мероприятия по повышению коэффициента мощности трехфазных установок. Заземление и зануление электроустановок.

Магнитные цепи. Область применения МЦ с постоянной МДС. Магнитное поле и его характеристики: B; Ф; H; F; μr; μo;μa. Ферромагнитные материалы и их свойства.

Законы магнитной цепи: полного тока, электромагнитной силы (Ампера), электромагнитной индукции (Фарадея), Ома. Расчет однородной магнитной цепи: прямая и обратная задачи. Тяговая сила электромагнита.

Магнитные цепи с переменной МДС. Особенности МЦ с переменной МДС: гистерезис; вихревые токи. Уравнение электрического. равновесия. Контакторы. Магнитные пускатели.

Трансформаторы. Назначение и применение трансформаторов. Устройство и принцип действия трансформаторов. Режимы работы: холостого хода.; нагрузочный; опыт короткого замыкания; аварийное КЗ. Схема замещения трансформатора. Внешняя характеристика трансформатора. КПД трансформатора. Трехфазные трансформаторы. Автотрансформаторы. Измерительные трансформаторы.

Асинхронные двигатели (АД). Применение АД. Устройство АД. Принцип действия АД. Энергетическая диаграмма АД. Механические свойства АД. Естественная механическая характеристика АД и ее построение по паспортным и по каталожным данным. Рабочие характеристики АД. Пуск АД. Электрическое торможение АД. Регулирование скорости ротора АД. Однофазные АД.

Машины постоянного тока (МПТ). Применение МПТ. Устройство МПТ. Принцип действия МПТ. ЭДС МПТ. Двигатели постоянного тока (ДПТ). Типы ДПТ. Пуск ДПТ. Естественные механические характеристики ДПТ. Регулирование скорости якоря ДПТ: реостатное; полюсное; якорное.

Синхронные машины (СМ). Устройство, принцип действия синхронных генераторов. Устройство, принцип действия синхронных двигателей. Пуск СД. Механические свойства СД. Зависимость тока статора СД от тока возбуждения. Синхронные компенсаторы.

Электроника. Элементы электронной техники. Резисторы. Конденсаторы. Катушки индуктивности. Трансформаторы. Диоды. Тиристоры. Транзисторы.

Выпрямители. Неуправляемые выпрямители. Определение, применение, упрощающие допущения при анализе выпрямителей. Схемы выпрямителей. Соотношения между напряжениями, токами и мощностями в выпрямителях. Выбор диодов. Волновые диаграммы, поясняющие работу выпрямителей. Сглаживающие фильтры. Внешние характеристики выпрямителей. Их КПД.

Управляемый выпрямитель по схеме ОМС

Усилители. Простейший УНЧ на биполярном транзисторе. Схема, назначение ее элементов. Принцип работы. Температурная стабилизация работы усилителей. Многокаскадные усилители. Усилители мощности. Усилители постоянного тока. Операционные усилители. Цифровые устройства (ЦУ). Преимущества ЦУ. Простейшие логические операции: ИЛИ, И, НЕ. Логические элементы: ИЛИ, И, НЕ ИЛИ-НЕ, И-НЕ. Их обозначение на структурных схемах, таблицы истинности, электрические схемные аналоги.

Триггеры. Цифровые счетчики импульсов. Регистры. Дешифраторы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Касаткин А.С. Электротехника: учебник для вузов / А.С. Касаткин,М.В. Немцов. М.: Издательский центр «Академия, 2005. 542 с.
ISBN 5-06-005276-1.

2. Иванов И.И. Электротехника. Основные положения, примеры и задачи / И.И. Иванов, А.Ф. Лукин, Г.И. Соловьев. СПб.: Лань, 2002. 192 с.

3. Сивяков Б.К. Электротехника и электроника: учеб. пособие / Б.К. Сивяков, В.С. Джумалиев, Д.Б. Сивяков. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2007. 120 с. ISBN 978-5-7433-1876-6.

4. Электротехника и основы электроники: методические указания и контрольные задания для студентов-заочников строит. и химико-

технологич. спец. вузов / Г.Н. Глушков, П.А. Фукс. – М.: Высш. шк., 1990. – 128 с.

5. Рекус Г.Г. Основы электротехники и электроники в задачах и решениях: учеб. пособие / Г.Г.Рекус. – М.: Высш. шк., 2005. – 343 с.

ISBN 5-06-004413-0.

1. ЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1.1 Анализ простых цепей постоянного тока

Цепь постоянного тока содержит несколько резисторов, соединенных смешанно. Схема цепи с указанными сопротивлениями приведена на рисунке 1.1. Всюду индекс тока или напряжения совпадает с индексом резистора, по которому проходит ток или на котором действует это напряжение. Например, через резистор R_3 проходит ток I_3 и на нем действует напряжение U_3. Определить также мощность, потребляемую всей цепью, и расход электрической энергии цепью за 8 ч работы.

Пояснить с помощью логических рассуждений характер изменения электрической величины, заданной в таблице вариантов (увеличится, уменьшится, останется неизменной), если один из резисторов замкнуть накоротко или выключить из схемы. При этом считать источник э.д.с. E идеальным (напряжение U на входе цепи неизменным). При трудностях логических пояснений ответа можно выполнить расчет требуемой величины в измененной схеме и на основании сравнения ее в двух схемах дать ответ на вопрос.

Дано: рис.1.1, I_2 = 3 А.

Определить I_5; замыкается накоротко R_4, рассмотреть изменение U_1.

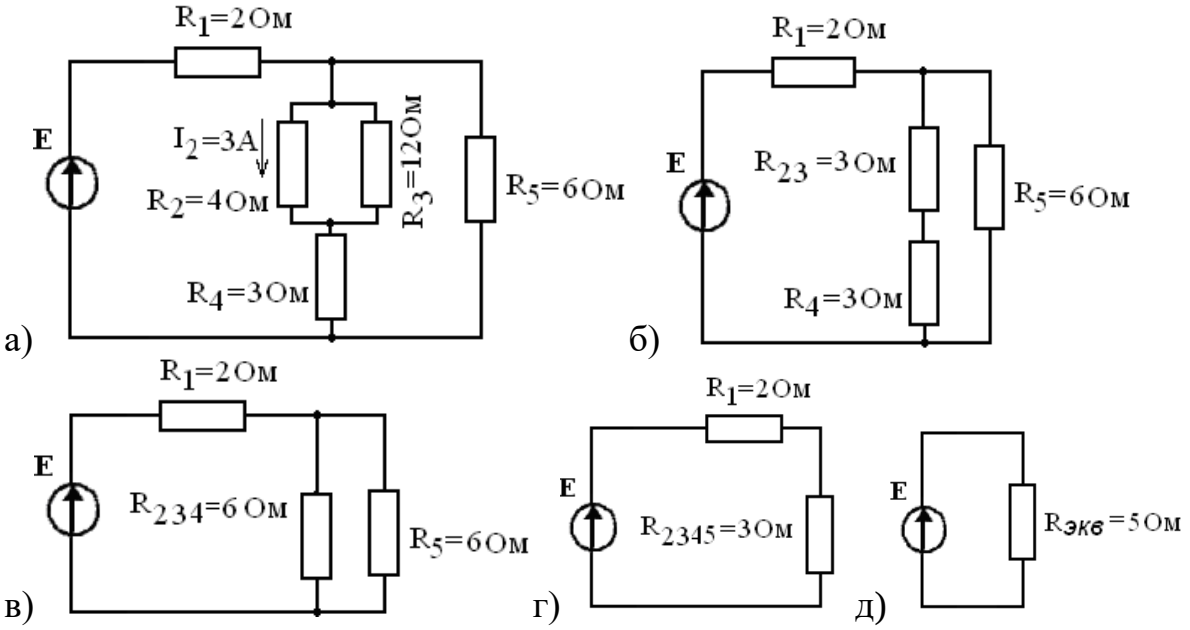


Рис.1.1. Простая электрическая цепь

Решение.

1.Определяем общее сопротивление разветвления R_2. R_3. Резисторы соединены параллельно

$$R_{23} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = \frac{4 \cdot 12}{4 + 12} = 3 \text{ Ом.}$$

Схема цепи примет вид, показанный на рис. 1.1б)

2. Резисторы R_{23} и R_4 соединены последовательно, их общее сопротивление

$R_{234} = R_{23} + R_4 = 3+3 = 6$ Ом.

Соответствующая схема приведена на рис.1.1в)

3. Резисторы R_{234} и R_5 соединены параллельно, их общее сопротивление равно:

$$R_{2345} = \frac{R_{234} R_5}{R_{234.} + R_5} = \frac{6 \cdot 6}{6 + 6} = 3 \text{ Ом.}$$

Теперь схема цепи имеет вид, приведенный на рис.1.1г).

4. Находим эквивалентное сопротивление всей цепи:

$R_{экв} = R_1 + R_{2345} = 2 + 3 = 5$ Ом.

5.Определяем падение напряжения на резисторе R_2:

$U_2 = I_2 R_2 = 3 \cdot 4 = 12$ В.

Это же напряжение приложено к резистору R_3, поэтому ток в резисторе R_3:

$I_3 = U_2/R_3 = 12/12 = 1$ А.

6.Ток I_4 протекающий через резистор R_4 равен сумме токов I_2 и I_3:

$I_4 = I_2 + I_3 = 3 + 1 = 4$ А.

Так как сопротивление $R_{234} = R_5$, согласно расчетам, то ток I_5, протекающий через резистор R_5 так же будет равен 4 А.

7. Напряжение $U_{234} = U_5 = I_4 \cdot R_{234} = 4 \cdot 6 = 24$ В.

8.Ток в неразветвленном участке цепи:

$I_1 = I_4 + I_5 = 4 + 4 = 8$ А.

9. Напряжение в резисторе R_1:

$U_1 = I_1 \cdot R_1 = 8 \cdot 2 = 16$ В.

10. Напряжение на входе цепи:

$U = E = U_1 + U_5 = 16 + 24 = 40$ В.

11. При замыкании резистора R_4 эквивалентное сопротивление параллельных ветвей будет равно:

$$R_{235} = \frac{R_{2.3} R_5}{R_{2.3} + R_5} = \frac{3 \cdot 6}{3 + 6} = 2 \text{ Ом.}$$

Тогда эквивалентное сопротивление всей цепи:

$R_{экв} = R_1 + R_{235} = 2 + 2 = 4$ Ом.

12. Поскольку напряжение на входе цепи остается неизменным, то ток в неразветвленном участке цепи возрастет до величины:

$I_1 = U/R_{экв} = 40/4 = 10$ А.

13. Напряжение на резисторе R_1 возрастет до величины:

$U_1 = I_1 R_1 = 10 \cdot 2 = 20$ В.

14. Мощность потребляемая электрической цепью:
$P = U \cdot I = 40 \cdot 8 = 320$ Вт.
15. Расход электрической энергии цепью за 8 ч работы:
$W = P \cdot \tau = 320 \cdot 8 = 2560$ Вт·ч = 2,56 кВт·ч
Контрольное задание выполнено.

1.2 Анализ сложных цепей постоянного тока

Для электрической цепи, изображенной на рис. 1.2, выполнить следующее:

1.Составить уравнения для определения токов путем непосредственного применения законов Кирхгофа (указав, для каких узлов и контуров эти уравнения записаны). Решать эту систему уравнений не следует.

2.Определить токи в ветвях методом контурных токов.

3. Определить режимы работы активных элементов и составить баланс мощностей.

4. Проверку правильного решения задачи провести по второму закону Кирхгофа.

Дано: $E_1 = 130$ В, $E_2 = 110$ В, $R_1 = 15$ Ом, $R_2 = 11$ Ом, $R_3 = 19$ Ом, $R_4 = 14$ Ом, $R_5 = 21$ Ом, $R_6 = 16$ Ом.

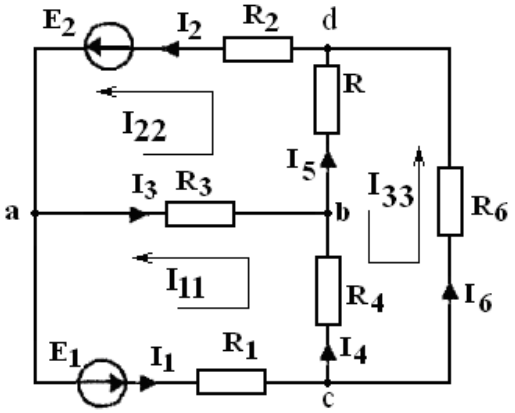


Рис.1.2. Сложная электрическая цепь

Схема содержит шесть ветвей, следовательно, имеет шесть неизвестных тока. Выбираем условно положительные направления токов (на схеме указаны стрелками) для которых по законам Кирхгофа необходимо составить шесть уравнений. Число узлов в схеме четыре, поэтому по первому закону Кирхгофа необходимо составить три уравнения:

$-I_1 - I_2 + I_3 = 0$	для узла (a)	(1)
$I_1 - I_4 - I_6 = 0$	для узла (c)	(2)
$-I_2 + I_5 + I_6 = 0$	для узла (d)	(3)

Для составления недостающих двух уравнений разбиваем схему на три независимых контура. Обход контуров проводим против движения часовой стрелки и составляем для каждого из них уравнение, пользуясь вторым законом Кирхгофа:

$E_1 = R_1 I_1 + R_4 I_4 - R_3 I_3$ для первого контура (4)

$E_2 = R_2 I_2 + R_3 I_3 + R_5 I_5$ для второго контура (5)

$-R_4 I_4 - R_5 I_5 + R_6 I_6 = 0$ для третьего контура (6)

В этих уравнениях все ЭДС и токи, совпадающие с направлением обхода контура, записываются со знаком плюс; ЭДС и токи, направленные навстречу обходу - со знаком минус. Как видно из данного примера, общее число уравнений, составленных по первому и второму законам Кирхгофа, равно числу неизвестных токов, т.е. числу ветвей.

2. Приписываем каждому независимому контуру свой контурный ток: I_{11}, I_{22}, и выбираем произвольное направление каждого из них (см. рис. 1.2). Удобно выбирать направление контурных токов во всех контурах единообразно - по часовой стрелке или против, а направления обхода контуров — по контурным токам.

Составляем уравнения по второму закону Кирхгофа для каждого контура

$$\begin{cases} I_{11}(R_1 + R_3 + R_4) - I_{22}R_3 - I_{22}R_4 = E_{11} \\ -I_{11}R_3 + I_{22}(R_2 + R_3 + R_5) - I_{22}R_5 = E_{22} \\ -I_{11}R_4 - I_{22}R_5 + I_{33}(R_4 + R_5 + R_6) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

Подставляя численные значения ЭДС, источника тока и сопротивлений, получим:

$$\begin{cases} I_{11}(15 + 19 + 14) - I_{22}\cdot 19 - I_{33}\cdot 14 = 130 \\ -I_{11}19 + I_{22}(11 + 19 + 21) - I_{33}\cdot 21 = 110 \\ -I_{11}\cdot 14 - I_{22}\cdot 21 + I_{33}(14 + 21 + 16) = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 48\cdot I_{11} - 19\cdot I_{22} - 14\cdot I_{22} = 130 \\ -19\cdot I_{11} + 51\cdot I_{22} - 21\cdot I_{22} = 110 \\ -14\cdot I_{11} - 21\cdot I_{22} + 51\cdot I_{33} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

Полученная система уравнений рассчитывается по методу Крамара:

$$I_{11} = \frac{\Delta_{I_{11}}}{\Delta},\ I_{22} = \frac{\Delta_{I_{22}}}{\Delta} \quad (9)$$

где Δ - определитель системы уравнений (8).

Решим систему трех уравнений первой степени с тремя неизвестными. Соответствующие определители Δ_{11}, Δ_{22}, получаемые из Δ

путем замены первого, второго и третьего столбцов столбцом свободных членов, равны

$$\Delta = \begin{vmatrix} 48 & -19 & -14 \\ -19 & 51 & -21 \\ -14 & -21 & 51 \end{vmatrix} = 48\cdot51\cdot51 + (-14)\cdot(-19)\cdot(-21) + (-14)\cdot(-19)\cdot(-21) -$$

(-14)·51·(-14) - 48·(-21)·(-21) - 51·(-19)·(-19) = 124848 – 5586 – 5586 - 9996 – 21168 – 18411 = 64101

$$\Delta_{I_{11}} = \begin{vmatrix} 130 & -19 & -14 \\ 110 & 51 & -21 \\ 0 & -21 & 51 \end{vmatrix} = 130\cdot51\cdot51 + (-14)\cdot110\cdot(-21) + 0\cdot(-19)\cdot(-21) -$$

(-14)·51·0 - 130·(-21)·(-21) - 51·(-19)·110 = 338130 + 32340 + 0 + 0 – 57330 + 106590 = 419730

$$\Delta_{I_{22}} = \begin{vmatrix} 48 & 130 & -14 \\ -19 & 110 & -21 \\ -14 & 0 & 51 \end{vmatrix} = 48\cdot110\cdot51 + (-14)\cdot(-19)\cdot0 + (-14)\cdot130\cdot(-21) -$$

(-14)·110·(-14) - 48·0·(-21) - 51·(-19)·130 = 269280 + 0 + 38220 - 21560 + 0 + 125970 = 411910

$$\Delta_{I_{33}} = \begin{vmatrix} 48 & -19 & 130 \\ -19 & 51 & 110 \\ -14 & -21 & 0 \end{vmatrix} = 48\cdot0\cdot51 + (-14)\cdot(-19)\cdot110 + (-19)\cdot130\cdot(-21) -$$

130·51·(-14) - 48·110·(-21) - 0·(-19)·(-19) = 0 + 29260 + 51870 + 92820 + 110880 - 0 = 284830

Воспользуемся формулами Крамара и определим контурные токи:

$$I_{11} = \frac{\Delta_{I_{11}}}{\Delta} = \frac{419730}{64101} = 6{,}55 \text{ А.}$$

$$I_{22} = \frac{\Delta_{I_{22}}}{\Delta} = \frac{411910}{64101} = 6{,}43 \text{ А.}$$

$$I_{33} = \frac{\Delta_{I_{33}}}{\Delta} = \frac{284830}{64101} = 4{,}44 \text{ А.}$$

4. Значения токов в ветвях находятся как алгебраическая сумма соответствующих контурных токов. Например, ток I_3 в смежной ветви совпадает по направлению с I_{22} и направлен навстречу I_{11}, поэтому

$I_3 = I_{22} – I_{11}$= 6,44 – 6,55 = - 0,12 А

$I_4 = I_{11} – I_{33}$= 6,55 – 4,44 = 2,11 А

$I_5 = I_{22} – I_{33}$= 6,43 – 4,44 = 1,99 ≈ 2,0 А

5. Ток I_1 в несимметричной ветви (по внешней ветви) равен контурному току I_{11}, поэтому: $I_1 = I_{11} = 6{,}55$ А, соответственно $I_2 = I_{22} = 6{,}43$ А.

$I_6 = I_{33} = 4{,}44$ А.

Метод контурных токов позволяет уменьшить число уравнений, необходимых для решения задачи до числа независимых контуров.

Составим баланс мощностей:

$E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 + R_4 I_4^2 + R_5 I_5^2 + R_6 I_6^2$

$130 \cdot 6{,}55 + 110 \cdot 6{,}43 = 15 \cdot 6{,}55^2 + 11 \cdot 6{,}43^2 + 19 \cdot 0{,}12^2 + 14 \cdot 2{,}11^2 + 21 \cdot 2^2 + 16 \cdot 4{,}44^2$

$851{,}5 + 707{,}3 = 643{,}5 + 454{,}8 + 0{,}3 + 62{,}3 + 84 + 315{,}4$

1558,8 Вт = 1560,4. Вт.

Погрешность расчетов составляет 0,1%, следовательно, задача решена, верно. Проводим проверку правильности решения задачи по второму закону Кирхгофа для первого контура:

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

$130 = 15 \cdot 6{,}55 + 14 \cdot 2{,}11 + 19 \cdot 0{,}12$

$130 = 98{,}25 + 29{,}54 + 2{,}28$

130 В = 130,07 В.

Контрольное задание выполнено.

2. ОДНОФАЗНЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

2.1. Основные понятия

При изображении реального приемника электрической энергии в виде схемы замещения, на переменном токе пользуются всего тремя элементами, которые называют идеальными:

- резистивный элемент R, сопротивление которого в цепи переменного тока принято называть активным сопротивлением;
- емкостный элемент C. Параметром идеального емкостного элемента является его электрическая емкость C;
- идеальный индуктивный элемент цепи L. Параметром идеального индуктивного элемента является его индуктивность L.

В табл.1 показаны условные графические изображения резистивного, емкостного, индуктивного элементов.

К идеальным резистивным элементам могут быть отнесены реостаты, радиорезисторы, большинство электронагревательных устройств (паяльники, электропечи, электролампы накаливания, утюги, сушильные шкафы, электрокалориферы, водонагреватели и т. д.)

Примером идеального емкостного элемента является конденсатор, а идеального индуктивного элемента индуктивная катушка, с малым

активным сопротивлением.

Основные свойства элементов цепей переменного тока приведены в табл. 1. Большинство приемников электрической энергии имеют активно-индуктивный характер, т.е. их схемы замещения могут быть представлены последовательным соединением резистивного R и индуктивного L элементов, рис. 2.1.

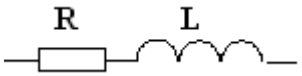


Рис. 2.1. Активно-индуктивная ветвь

Такими схемами замещения могут быть представлены: обмотки электрических двигателей и генераторов, обмотки трансформаторов, катушки магнитных пускателей, дроссели переменного тока, катушки измерительных электромеханических приборов и др. В большинстве инженерных задач математическими моделями нагрузок являются либо резистивная, либо резистивно-индуктивная схема замещения.

Схема замещения с последовательным соединением R, L и C используется для расчета и анализа в радио - и электронных схемах.

В табл. 2 приведены основные соотношения для последовательной цепи R, L и C.

Таблица 1

Основные свойства элементов цепей переменного тока

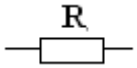
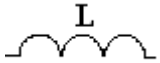
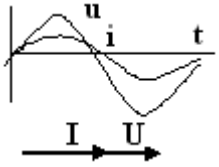
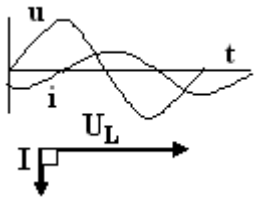
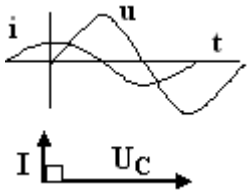
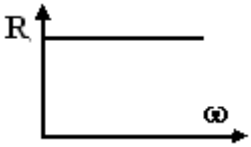
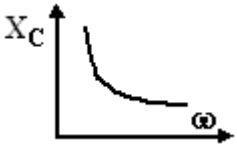
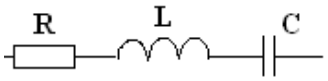
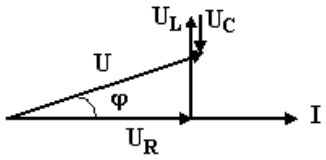
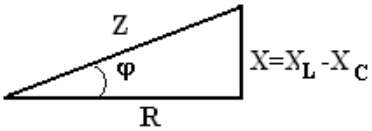
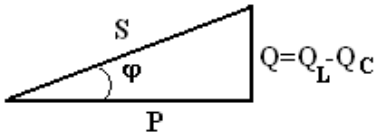
Двухполюсник	Резистор	Идеальная катушка	Идеальный конденсатор
Обозначение			
Связь мгновенных значений тока и напряжения	$i = \frac{u_R}{R}$	$u_L = L\frac{di}{dt}$	$i = C\frac{du_C}{dt}$ или $u_C = \frac{1}{C}\int idt$
Закон Ома	$I = \frac{U_R}{R}$	$I = \frac{U_L}{\omega L}$	$I = U_C / 1/\omega C$
Закон Ома в комплексной форме	$\dot{I} = \frac{\dot{U}_R}{R}$	$\dot{I} = -j\frac{\dot{U}_L}{\omega L}$	$\dot{I} = j\omega C\dot{U}_C$
Сопротивление	Активное R	Реактивное индуктивное $X_L = \omega L = 2\pi f L$	Реактивное емкостное $X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$
Волновые и векторные диаграммы			
Угол сдвига фаз	$\varphi = 0$	$\varphi = 90°$	$\varphi = -90°$
Зависимость сопротивления от частоты			
Мощность	Активная $P = R \cdot I^2$, Вт	Реактивная индуктивная $Q_L = X_L \cdot I^2$, ВАр	Реактивная емкостная $Q_C = X_C \cdot I^2$, ВАр

Таблица 2

Основные соотношения для последовательной цепи

Схема замещения	
Уравнение равновесия напряжений	$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C$
Закон Ома для действующих значений тока и напряжения	$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}$
То же в комплексной форме	$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}} = \frac{\dot{U}}{R + j(X_L + X_C)}$
Полное сопротивление цепи	$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$
То же в комплексной форме	$\underline{Z} = R + j(X_L - X_C)$
Угол сдвига фаз между током и напряжением $X_L = X_C$ $X_L > X_C$ $X_L < X_C$	$\varphi = arctg\frac{X_L - X_C}{R}; \cos\varphi = \frac{R}{Z}$ $\varphi = 0$ $0 < \varphi < 90^o$ $0 > \varphi > 90^o$
Векторная диаграмма цепи $X_L > X_C$	
Полная мощность, В·А	S=U·I
Активная мощность, Вт	P=U·I·cosφ=S·cosφ
Реактивная мощность, В·Ар	Q= U·I·sinφ=S·sinφ
Треугольник сопротивлений при условии $X_L > X_C$	
Треугольник мощностей при условии $X_L > X_C$	

2.2. Методические указания к решению задач

Задача 1. В цепь синусоидального тока напряжением U = 100 В и частотой f = 50 Гц включена катушка с активным сопротивлением R = 4 Ом и индуктивным X_L = 5 Ом.

Определить: Ток в катушке; коэффициент мощности; полную, активную и реактивную мощности; емкость, при которой в цепи наступит резонанс токов; построить векторную диаграмму.

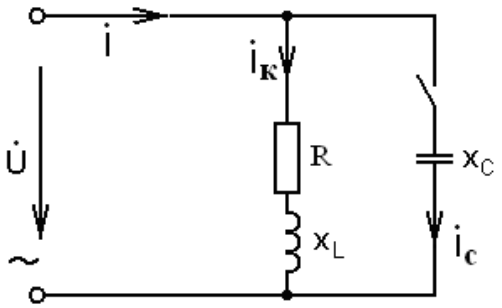


Рис.2.1

Решение.

1. Определяем полное сопротивление индуктивной катушки:

$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{4^2 + 5^2} = 6{,}4$ Ом.

2. Ток в катушке определяем по закону Ома: I= U/Z = 100/6,4= 15,6 А.

3. Определяем коэффициент мощности: cosφ = R/Z = 4/6,4 = 0,625

4. Угол сдвига фаз между током I и напряжением U:

φ = arccos R/Z = arccos 4/6,4 = arccos 0,625 = 51°.

5. Полная мощность S = UI = 100·15,6 = 1560 ВА.

6. Активная мощность P = UI cosφ =100·15,6 ·0,625 = 975 Вт.

7. Реактивная мощность Q= UI sinφ = 100·15,6 ·0,78 = 1217,5 ВАр.

8. Резонанс токов происходит в цепях с параллельным соединением индуктивной катушки и емкости при условии равенства их реактивных проводимостей $b_L = b_C$. Определим реактивную проводимость индуктивной катушки по формуле:

$b_L = X_L/Z^2 = 5/6{,}4^2 = 0{,}122$ См.

Так как проводимость емкости равна $b_C = 1/X_C = \frac{1}{1/\omega C} = \omega C$, то емкость конденсатора, при которой произойдет резонанс токов, равна:

$C = b_C/\omega = b_C/2\pi f = 0{,}122/2\cdot 3{,}14\cdot 50 = 0{,}0003885$Ф = 388,5 мкФ.

9. Для построения векторной диаграммы определим напряжения на активном и реактивном сопротивлениях:

$U_R = IR = 15{,}6\cdot 4 = 62{,}4$ В, $U_L = IX_L = 15{,}6\cdot 5 = 78$ В.

Выбираем масштаб: по току $m_I = 2$ А/см, по напряжению $m_U = 10$ В/см.

При построении векторной диаграммы первым строим вектор тока, так как он является общим при последовательном соединении элементов цепи. По направлению этого вектора строим вектор напряжения на активном сопротивлении. Под углом 90° в сторону опережения строим вектор напряжения на индуктивности. Сумма векторов U_R и U_L дает вектор тока в начале электрической цепи U (рис.2.2).

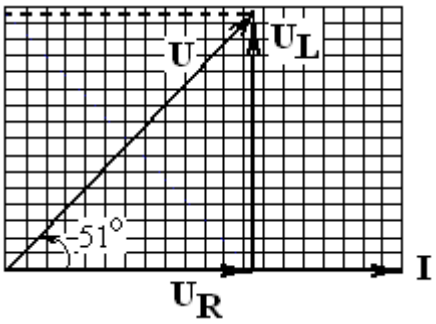


Рис.2.2. Векторная диаграмма

Задача 2. Цепь переменного тока содержит различные элементы (резисторы, индуктивности, емкости), включенные последовательно. Начертить схему цепи и определить следующие величины, относящиеся к данной цепи: полное сопротивление Z; напряжение U, приложенное к цепи; ток I; угол сдвига фаз φ (по величине и знаку); активную P, реактивную Q и полную S мощности цепи. Начертить в масштабе векторную диаграмму цепи и пояснить ее построение. Пояснить характер изменения (увеличится, уменьшится, останется без изменения) тока, активной и реактивной мощности в цепи при увеличении частоты тока в два раза. Напряжение, приложенное к цепи, считать неизменным.

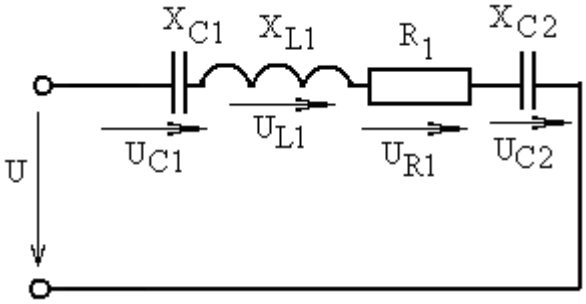


Рис.2.3. Электрическая схема

Дано: R_1 = 12 Ом, X_{L1} = 4 Ом, X_{C1} = 12 Ом, X_{C2} = 8 Ом, I = 4 А.

Решение:

Полное сопротивление цепи:

$$Z = \sqrt{R_1^{\ 2} + (X_{L1} - X_{C1} - X_{C2})^2} = \sqrt{12^2 + (4 - 12 - 8)^2} = 20 \text{ Ом}$$

Напряжение, приложенное к цепи:

$U = I \cdot Z = 4 \cdot 20 = 80$ В.

Угол сдвига фаз:

$$\varphi = \text{arctg}\frac{X}{R} = \text{arctg}\frac{X_{L1} - X_{C1} - X_{C2}}{R_1} = \text{arctg}\frac{4 - 12 - 8}{12} = -53^{\circ}$$

Коэффициент мощности: $\cos\varphi = \cos 53^{\circ} = 0{,}6$

Определяем активную мощность цепи:

$P = I^2 R_1 = 4^2 \cdot 12 = 192$ Вт. или $P = UI\cos\varphi = 80 \cdot 4 \cdot 0{,}6 = 192$ Вт.

Определяем реактивную мощность цепи:

$Q = UI\sin\varphi = 80\cdot4\cdot(-0,8) = -256$ вар.

Определяем полную мощность цепи:

$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{192^2 + 256^2} = 320$ ВА или $S = UI = 80\cdot4 = 320$ ВА.

Определяем падения напряжения на сопротивлениях цепи:

$U_{R1} = IR_1 = 4\cdot12 = 48$ В; $U_{L1} = IX_{L1} = 4\cdot4 = 16$ В; $U_{C1} = IX_{C1} = 4\cdot12 = 48$ В;

$U_{C2} = IX_{C2} = 4\cdot8 = 32$ В.

Построение векторной диаграммы начинаем с выбора масштаба для тока и напряжения. Задаемся масштабом по току m_I = 0,5 А/см, по напряжению m_U = 10 В/см. Длины векторов согласно выбранного масштаба: ℓ_I = 8см; ℓ_U = 8 см; ℓ_{UR} = 4,8 см; ℓ_{UL} = 1,6 см; ℓ_{UC1} = 4,8 см; ℓ_{UC2} = 3,2 см. Построение векторной диаграммы начинаем с вектора тока, который откладываем по горизонтали. Вектор падения напряжения на активном сопротивлении совпадает по фазе с вектором тока. Из конца этого вектора откладываем в сторону опережения на 90° вектор напряжения на индуктивной катушке, а в сторону отставания на 90° откладываем вектор напряжения на первом конденсаторе и к нему прибавляем вектор напряжения второго конденсатора. Геометрическая сумма векторов напряжений U_R, U_L, U_C равна напряжению U, приложенному к цепи.

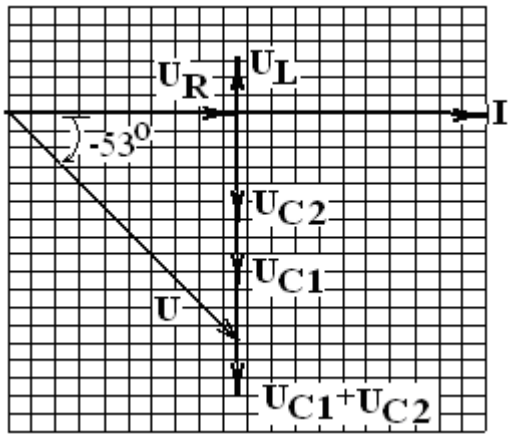


Рис.2.4. Векторная диаграмма

При увеличении частоты тока в два раза сопротивление индуктивного элемента цепи увеличится в два раза, а емкостных элементов уменьшится в два раза, так как $X_L = \omega L = 2\pi fL$ и $X_C = 1/\omega C = 1/2\pi fC$, где f - частота тока. Реактивное сопротивление цепи $X = X_L - X_C$ = 8-10 = 2 Ом уменьшится, следовательно уменьшится полное сопротивление цепи, а ток в цепи при неизменном напряжении увеличится. Так как ток увеличится, то активная мощность $P = I^2R_1$ также

увеличится. Так как реактивное сопротивление при увеличении частоты тока уменьшится, то реактивная мощность $Q = I^2X$ также уменьшится.

Задача 3. Напряжение на зажимах цепи, изображенной на рис. 2.5, изменяется по закону $u = U_m \sin\omega t$. Амплитудное значение напряжение U_m, значения активных сопротивлений R_1 и R_2, индуктивностей катушек L_1 и L_2, емкостей конденсаторов C_1 и C_2.

Частота питающего напряжения f= 50 Гц.

Необходимо:

1. Определить показания приборов, указанных на схеме (см. рис.2.5).
2. Определить закон изменения тока в цепи.
3. Определить закон изменения напряжения между точками, к которым подключен вольтметр.
4. Определить активную, реактивную и полную мощности источника, активную, реактивную и полную мощности приемников. Составить и оценить баланс мощностей. Рассчитать коэффициент мощности.
5. Определить характер (индуктивность, емкость) и параметры элемента, который должен быть включен в электрическую цепь для того, чтобы в ней имел резонанс напряжений.

Дано. U_m = 240 В, R_1 = 10 Ом, R_2 = 12 Ом, L_1 = 0,01 Гн, C_2 = 800 мкФ.

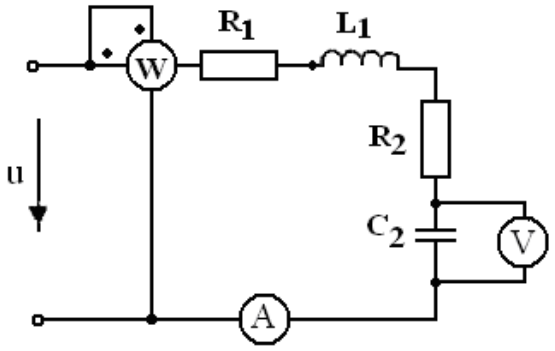


Рис.2.5. Электрическая схема

Решение.

Определим полное сопротивление электрической цепи.

Для этого необходимо определить реактивные сопротивления индуктивной катушки и конденсатора:

$X_{L1} = \omega L_1 = 2\pi f L_1 = 2\cdot 3{,}14\cdot 50\cdot 0{,}01 = 3{,}14$ Ом.

$X_{C2} = 1/\omega C_2 = 1/2\pi f C_2 = 1/(2\cdot 3{,}14\cdot 50\cdot 800\cdot 10^{-6}) = 4$ Ом.

Полное сопротивление:

$$Z=\sqrt{(R_1+R_2)^2+(X_{L_1}-X_{C_2})^2}=\sqrt{(10+12)^2+(3{,}14-4)^2} = 22{,}02 \text{ Ом.}$$

Действующее значение U входного напряжения:

$U = U_m/\sqrt{2} = 0{,}707\, U_m = 0{,}707\cdot 240 = 170$ В.

Ток в цепи определим по закону Ома: $I = U/Z = 170/22{,}02 = 7{,}72$ А.

Угол сдвига фаз между напряжением U и током I:

$\varphi = \text{arctg}\ \frac{X_L - X_{\tilde{N}}}{R_1 + R_2} = \text{arctg}\ \frac{3{,}14-4}{10+12} = -2{,}2^o$

Активная мощность приемников, показываемая ваттметром:

$P = (R_1+R_2)I^2 = 22\cdot 7{,}72^2 = 1311{,}2$ Вт.

Напряжение на конденсаторе показываемое вольтметром:

$U_{C2} = x_{C2}I = 4\cdot 7{,}72 = 30{,}88$ В.

Для записи закона изменения тока в цепи найдем его амплитудное значение:

$I_m = I\sqrt{2} = 1{,}41\cdot 7{,}72 = 10{,}9$ А,

тогда закон изменения тока в цепи:

$i = I_m\sin(\omega t+\varphi) = 10{,}9\ \sin(314t+2{,}2^o)$.

Закон изменения напряжения на конденсаторе U_{C2}:

$u_{C2} = U_{mC2}\ \sin(\omega t-\varphi) = U_{C2}\sqrt{2}\sin(\omega t-\varphi) = 30{,}88\cdot 1{,}41\cdot\sin(314t-90^o) = 43{,}5\cdot\sin(314t-90^o)$.

Полная мощность источника: $S_{ист} = UI = 170\cdot 7{,}72 = 1312{,}4$ ВА

Активная мощность источника:

$P_{ист} = UI\cos\varphi = 170\cdot 7{,}72\cdot\cos 2{,}2^o = 1311{,}4$ Вт.

Реактивная мощность источника:

$Q_{ист} = UI\sin\varphi = 170\cdot 7{,}72\cdot\sin 2{,}2^o = -50{,}4$ ВАр.

Активная мощность приемников: $P_{пр} = rI^2 = 1311{,}2$ Вт.

Реактивная мощность приемников:

$Q_{пр} = Q_{L1} - Q_{C1} = x_{L1}I^2 - x_{C2}I^2 = 3{,}14\cdot 7{,}72^2 - 4\cdot 7{,}72^2 = -51{,}2$ ВАр.

Полная мощность приемников:

$S_{пр} = \sqrt{P^2_{пр} + Q^2_{пр}} = \sqrt{1311{,}2^2 + 51{,}2^2} = 1312{,}2$ ВА.

Баланс мощностей источника и приемников электрической энергии:

$S_{ист} = 1312{,}4 \approx S_{пр} = 1312{,}2$ ВА. $P_{ист} = 1311{,}4 \approx P_{пр} = 1311{,}2$ Вт.

$Q_{ист} = -50{,}4 \approx Q_{пр} = -51{,}2$ ВАр.

Коэффициент мощности: $\cos\varphi = P_{пр}/S_{пр} = 1311{,}2/1312{,}2 = 0{,}999$.

Резонанс напряжений имеет место в последовательной цепи R, L, C в том случае, если общее реактивное сопротивление цепи равно нулю, т.е. при $X_L = -X_C$. Для получения резонанса напряжений в цепь необходимо добавить индуктивную катушку с сопротивлением равным

$X_{L1} - X_{C2} = 3{,}14 - 4 = 0{,}86$ Ом. Индуктивность такой катушки будет равна: $X_{L2} = \omega L_2$, отсюда $L_2 = X_{L2}/\omega = 0{,}86/314 = 0{,}0027$ Гн.

Задача 4. Цепь переменного тока содержит различные элементы (резисторы, индуктивности, емкости), образующие две параллельные ветви. Схема цепи приведена на рис.2.6. Индекс «1» у дополнительного

параметра означает, что он относится к первой ветви; индекс «2»- ко второй.

Начертить схему цепи и определить следующие величины: токи I_1 и I_2 в обоих ветвях; ток I в неразветвленной части цепи; напряжение U, приложенное к цепи; активную P, реактивную Q и полную S мощности для всей цепи. Начертить в масштабе векторную диаграмму цепи.

Каким образом в заданной цепи можно получить резонанс токов? Если цепь не позволяет достигнуть резонанса токов, то пояснить, какой элемент надо дополнительно включить в цепь для этого. Начертить схему такой цепи.

Дано: $R_1 = 2$ Ом, $R_2 = 2$ Ом, $X_{L2} = 3$ Ом, $P_2 = 16$ Вт.

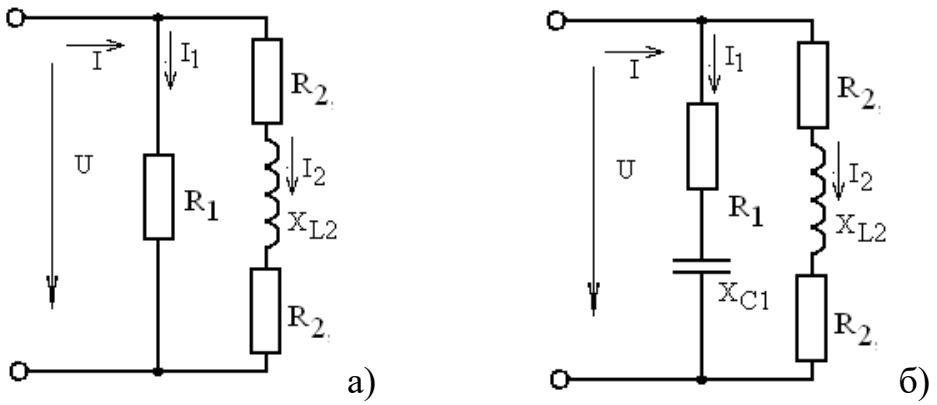


Рис.2.6. Параллельное соединение ветвей

Решение.

Полное сопротивление второй ветви:

$Z_2 = \sqrt{R_2^{\ 2} + X_{L2}^{\ 2}} = \sqrt{(2+2)^2 + 3^2} = 5$ Ом.

Активная проводимость второй ветви: $q_2 = \dfrac{R_2}{Z_2^{\ 2}} = \dfrac{4}{5^2} = 0{,}16$ См.

Реактивная проводимость второй ветви: $b_2 = \dfrac{X_{L2}}{Z_2^{\ 2}} = \dfrac{3}{5^2} = 0{,}12$ См

Угол сдвига фаз второй ветви: $\varphi_2 = \arccos\dfrac{R_2}{Z_2} = \arccos\dfrac{2+2}{5} = 37^o$

Коэффициент мощности: $\cos\varphi_2 = \dfrac{R_2}{Z_2} = \dfrac{4}{5} = 0{,}8$

Ток второй ветви определим из формулы $P_2 = I_2^2 R_2$:

$I_2 = \sqrt{P_2 / R_2} = \sqrt{16/4} = 2$ А.

Напряжение U, приложенное к цепи: $U = P/I\cos\varphi = 16/2\cdot 0{,}8 = 10$ В.

Ток первой ветви: $I_1 = U/R_1 = 10/2 = 5$ А.

Активный ток второй ветви: $I_{a2} = I_2 \cos\varphi_2 = 2 \cdot 0{,}8 = 1{,}6$ А.

Реактивный ток второй ветви: $I_{p2} = I_2 \sin\varphi_2 = 2 \cdot \sin 37^o = 2 \cdot 0{,}6 = 1{,}2$ А.

Ток I в неразветвленной части цепи:

$$I = \sqrt{(I_{a1} + I_{a2})^2 + I_{p2}^{\ 2}} = \sqrt{(5 + 1{,}6)^2 + 1{,}2^2} = 6{,}7 \text{ А}.$$

Активная мощность первой ветви: $P_1 = R_1 I_1^2 = 2 \cdot 5^2 = 50$ Вт.

Реактивная мощность второй ветви: $Q_2 = X_{L2} I_2^2 = 3 \cdot 2^2 = 12$ ВАр.

Полная мощность электрической цепи:

$$S = \sqrt{(P_1 + P_2)^2 + Q_2^{\ 2}} = \sqrt{(50 + 16)^2 + 12^2} = 67 \text{ ВА}$$

Или $S = UI = 10 \cdot 6{,}7 = 67$ ВА.

В электрической цепи с параллельными ветвями можно получить резонанс токов при условии равенства реактивных проводимостей в первой и второй ветвях, содержащих в одной ветви индуктивную катушку, а в другой конденсатор. Для получения резонанса токов в заданной электрической схеме необходимо в первой ветви добавить конденсатор, согласно рис.2.6 (б).

Для построения векторной диаграммы выбираем масштаб: по току $m_I = 1$ А/см, по напряжению $m_U = 1$ В/см.

Первым строим вектор напряжения, так как он является общим для параллельных ветвей. По направлению этого вектора откладываем вектор тока первой ветви I_1. Под углом 37° в сторону отставания от напряжения строим вектор тока второй ветви I_2, который получается сложением векторов активного и реактивного токов второй ветви. Сложение векторов тока первой и второй ветви дают вектор тока в неразветвленном участке цепи I.

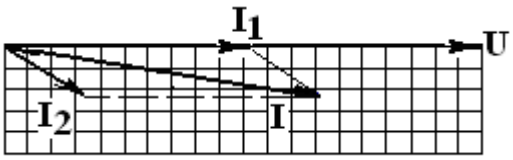


Рис.2.7. Векторная диаграмма

3. ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

3.1. Методические указания к решению заданий

Задача 1. Рассмотрим четырехпроводную трехфазную цепь (рис.3.1) с линейным напряжением $U_Л = 220$ *В*. Приемник включен звездой. Активные и индуктивные сопротивления фаз соответственно равны:

$R_a = 3$ *Ом,* $X_a = 4$ *Ом,* $R_b = 3$ *Ом,* $X_b = 5{,}2$ *Ом,* $R_c = 4$ *Ом,* $X_c = 3$ *Ом.* Следовательно, режим работы цепи несимметричный. Требуется определить фазные и линейные токи, ток в нулевом проводе, активную мощность всей цепи и каждой фазы в отдельности. Построить векторную диаграмму токов и напряжений на комплексной плоскости.

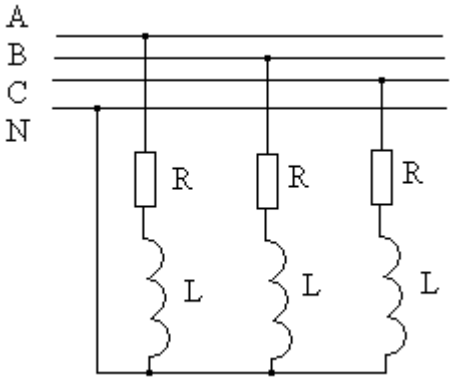


Рис.3.1. Соединение приемника по схеме звезда

Решение. Расчет трехфазной цепи осуществим комплексным методом. Положим, что вектор фазного напряжения $\dot{U}_a$ фазы *a* направлен по действительной оси, тогда $\dot{U}_a = \frac{U_л}{\sqrt{3}} = 127\,B,$ соответственно

$\dot{U}_b = 127e^{-j120^0}\,B,\ \dot{U}_c = 127e^{-j120^0}\ B.$

В этом случае трехфазная цепь распадается на три однофазные цепи, каждая со своим фазным напряжением. Находим линейные токи:

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{\underline{Z}_a} = \frac{127}{(3+j4)} = \frac{127}{(5e^{j53^0})} = 25{,}4e^{-53^0}\,A;$$

$$\dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{\underline{Z}_b} = \frac{127e^{-j120^0}}{(3+j5{,}2)} = \frac{127e^{-j120^0}}{(6e^{j60^0})} = 21{,}2e^{-j180^0}\ A;$$

$$\dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{\underline{Z}_c} = \frac{127e^{-j120^0}}{(4+j3)} = \frac{127e^{j120^0}}{(5e^{j37^0})} = 25{,}4e^{-j83^0}\ A.$$

Ток в нейтральном проводе по первому закону Кирхгофа является суммой комплексов линейных токов:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = (15{,}29 - j20{,}29) + (-21{,}2) + (3{,}1 + j25{,}21) = -2{,}81 + j4{,}92 = 5{,}67e^{j120^0}\,A.$$

Векторная диаграмма приведена на рис3.2.

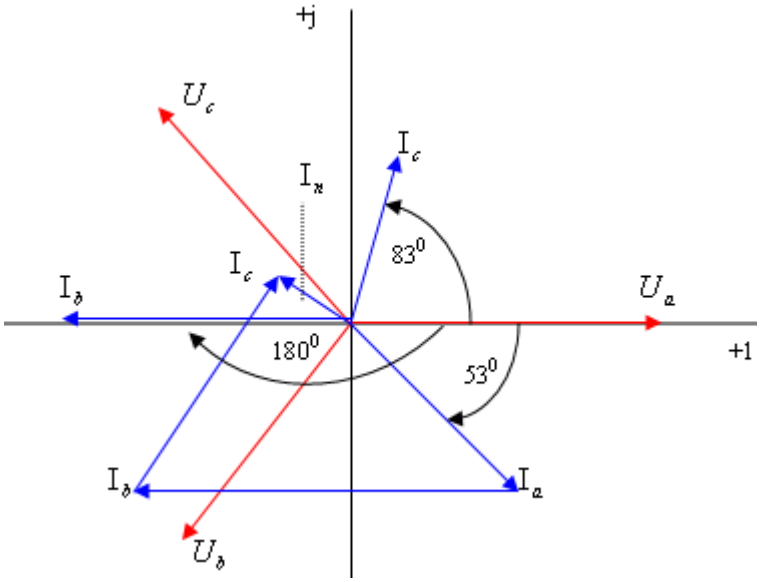


Рис.3.2. Векторная диаграмма

На векторной диаграмме показано, что ток нейтрального провода является векторной суммой линейных токов.

При несимметричной нагрузке для определения активной мощности можно определить мощность каждой фазы отдельно: $P_Ф = U_Ф I_Ф \cos\varphi$, а мощность всей трехфазной системы получить как сумму мощностей всех фаз. Однако проще активную мощность вычислить как мощность, рассеиваемую на активном сопротивлении.

$P_a = I_a^2 R_a = 25{,}4^2 \cdot 3 = 1935\ Вт;$

$P_b = I_b^2 R_b = 21{,}2^2 \cdot 3 = 1348\ Вт;$

$P_c = I_c^2 R_c = 2181\ Вт;$

$P = I_a^2 R_a + I_b^2 R_b + I_c^2 R_c = 5864\ Вт.$

Задача 2. Рассмотрим трехфазную цепь с линейным напряжением $U_Л = 220\ В$, преемник включен треугольником, сопротивление фазы которого $\underline{Z} = (10 + j10)\ Ом$ (рис.3.3). Требуется определить фазные и линейные токи, активную мощность всей цепи и каждой фазы в отдельности. Построить векторную диаграмму токов и напряжений на комплексной плоскости.

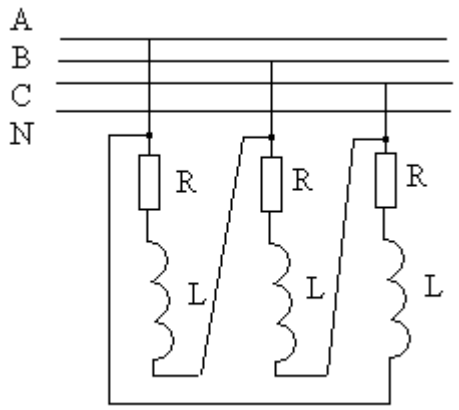


Рис.3.3. Соединение приемника по схеме треугольник

Решение. Примем, что вектор линейного напряжения $\dot{U}_{AB}$ направлен по действительной оси, тогда

$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{ab} = 220B; \dot{U}_{BC} = \dot{U}_{bc} = 220e^{-j120^0} B; \dot{U}_{CA} = \dot{U}_{ca} = 220e^{j120^0} B.$

Определим фазные токи:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{\underline{Z}} = \frac{220}{(10 + j10)} = 15{,}6e^{-j45^0} = 11 - j11A;$$

$$\dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{\underline{Z}} = \frac{220e^{-j120^0}}{(10 + j10)} = 15{,}6e^{-j165^0} = -15 - j4{,}03A;$$

$$\dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{\underline{Z}} = \frac{220e^{-j120^0}}{(10 + j10)} = 15{,}6e^{-j75^0} = 4{,}03 + j15A.$$

Находим линейные токи по первому закону Кирхгофа:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} = 6{,}97 - j26 = 26{,}9e^{-j75^0} A;$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} = -26 + j6{,}97 = 26{,}9e^{-j165^0} A;$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} = 19 + j19 = 26{,}9e^{-j45^0} A.$$

Активная мощность цепи при симметричной нагрузке может быть определена через линейные напряжения и ток:

$$P = \sqrt{3}U\ I\ \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 26{,}9 \cos 45^0 = 3RI_{Ф}^2 = 3 \cdot 10 \cdot 15{,}6^2 = 7300Вт.$$

На рис.3.4. приведена векторная диаграмма напряжений токов. На векторной диаграмме построен вектор линейного тока $\dot{I}_a$. Построение линейных векторов $\dot{I}_b$ и $\dot{I}_c$ студентами выполняются самостоятельно.

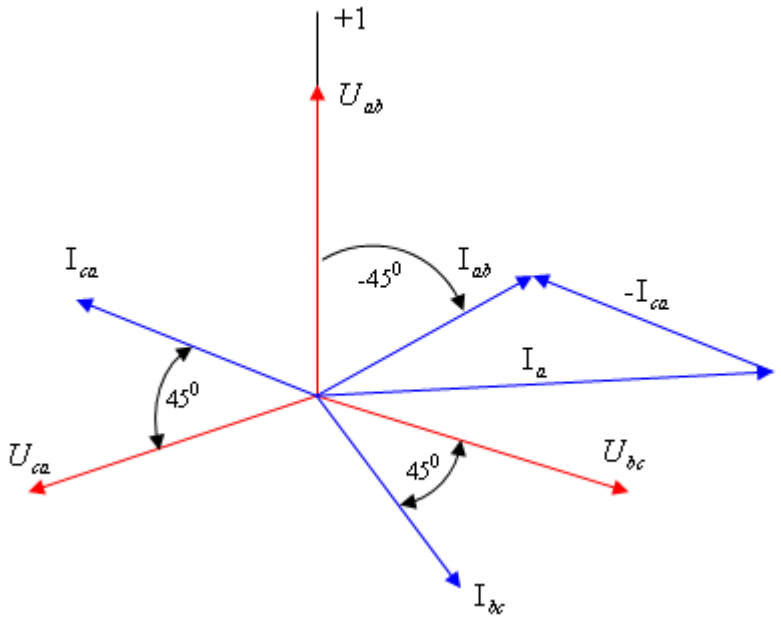


Рис.3.4. Векторная диаграмма

4. ТРАНСФОРМАТОРЫ

4.1. Контрольное задание

Задача 1. Для трехфазного трансформатора с заданными параметрами: мощность $S_{НОМ}$ = 630 *кВА*, соединение обмоток Y/Y_0 – 0, номинальное напряжение на зажимах первичной обмотки трансформатора 10000 *В*, напряжение холостого хода на зажимах вторичной обмотки трансформатора 400 *В*, напряжение короткого замыкания u_K = 5,5 %, мощность короткого замыкания P_K = 7,3 *кВт*, мощность холостого хода P_0 = 2,0 *кВт*, ток холостого хода I_0 составляет 3,0 % от $I_{1НОМ.}$ Определить номинальные токи первичной и вторичной обмоток, коэффициент мощности холостого хода, сопротивления первичной и вторичной обмоток. Построить внешнюю характеристику $U_2 = f_1(\beta)$ и зависимость КПД от нагрузки $\eta = f_2(\beta)$ для $\cos\varphi_2 = 0{,}8$.

4.2. Методические указания к выполнению задания

Номинальный ток первичной обмотки:

$$I_{1НОМ} = S_{НОМ}/(\sqrt{3}\cdot U_{1НОМ}) = 630\cdot1000/(1{,}73\cdot10000) = 36{,}42 \text{ А}.$$

Номинальный ток вторичной обмотки:

$$I_{2НОМ} = S_{НОМ}/(\sqrt{3}\cdot U_{2НОМ}) = 630\cdot1000/(1{,}73\cdot400) = 910{,}4 \text{ А}.$$

Ток холостого хода: $I_0 = 0{,}03\cdot I_{1НОМ} = 0{,}03\cdot36{,}42 = 1{,}1$ А.

Коэффициент мощности холостого хода:

$$\cos\varphi_0 = P_0/(\sqrt{3}\cdot U_{1НОМ}\cdot I_0) = 2000/(1{,}73\cdot10000\cdot1{,}1) = 0{,}105;$$

Угол сдвига между током холостого хода и напряжением: $\varphi_0 = 84^o$
Определим сопротивления обмоток.
Сопротивления короткого замыкания:
полное $Z_K = U_{K.Ф}/I_{K.Ф} = 0{,}055 \cdot 10000/(\sqrt{3} \cdot 36{,}42) = 8{,}73$ Ом;
активное $R_K = P_K/(3 \cdot I_K^2) = 7300/(3 \cdot 36{,}42^2) = 1{,}84$ Ом;
реактивное индуктивное $X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} = \sqrt{8{,}73^2 - 1{,}84^2} = 8{,}53\,Ом$.
Сопротивления первичной обмотки:
активное $R_1 = R_2^{/} = R_K/2 = 1{,}84/2 = 0{,}92$ Ом;
реактивное $X_1 = X_2^{/} = X_K/2 = 8{,}53/2 = 4{,}27$ Ом.
Сопротивления вторичной обмотки:
активное $R_2 = R_2^{/}/n^2 = 0{,}92/25^2 = 0{,}0015$ Ом;
реактивное $X_1 = X_2^{/}/n^2 = 4{,}27/25^2 = 0{,}0068$ Ом,
где $n = U_{1НОМ}/U_{20} = 10000/400 = 25$ коэффициент трансформации трансформатора.

Для построения внешней характеристики $U_2 = f_1(\beta)$ находим потерю напряжения во вторичной обмотке трансформатора:

$$\Delta U_2\,\% = \beta(u_a\%\cdot\cos\varphi_2 + u_p\%\cdot\sin\varphi_2),$$

где $u_a\%$, $u_p\%$ – соответственно активное и реактивное падения напряжений;

β – коэффициент нагрузки трансформатора; $\cos\varphi_2$ – коэффициент мощности нагрузки.

$u_a\% = u_K\%\cdot\cos\varphi_K$; $\cos\varphi_K = R_K/Z_K$;
$u_a\% = 5{,}5\cdot(1{,}84/8{,}73) = 1{,}16$ %;
$u_p\% = \sqrt{(u_K\%)^2 - (u_a\%)^2} = \sqrt{5{,}5^2 - 1{,}16^2} = 5{,}38$ %.

Напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора:

$$U_2 = (U_{20}/100)\cdot(100 - \Delta U_2\,\%).$$

Задаваясь различными значениями β определяем напряжение U_2 (табл. 4.1).
Расчет КПД в зависимости от β проведем по формуле:

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_{НОМ} \cdot \cos\varphi_2}{\beta \cdot S_{НОМ} \cdot \cos\varphi_2 + P_0 + \beta^2 \cdot P_K}.$$

Результаты расчета КПД сведены в табл. 4.1

Таблица 4.1

Зависимости КПД и напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора от коэффициента нагрузки

β	ΔU_2 %	U_2, В	η		β	ΔU_2 %	U_2, В	η
0,01	0,042	-	0,716		0,5	2,08	391,7	0,985
0,025	0,1	-	0,863		0,6	2,49	390,0	0,985
0,05	0,21	399,2	0,926		0,7	2,91	388,4	0,984
0,1	0,42	398,3	0,960		0,8	3,32	386,7	0,984
0,2	0,84	396,6	0,978		0,9	3,74	385,0	0,983
0,3	1,25	395,0	0,983		1,0	4,16	383,4	0,982
0,4	1,68	393,3	0,984					

Полученные характеристики показаны на рис. 4.

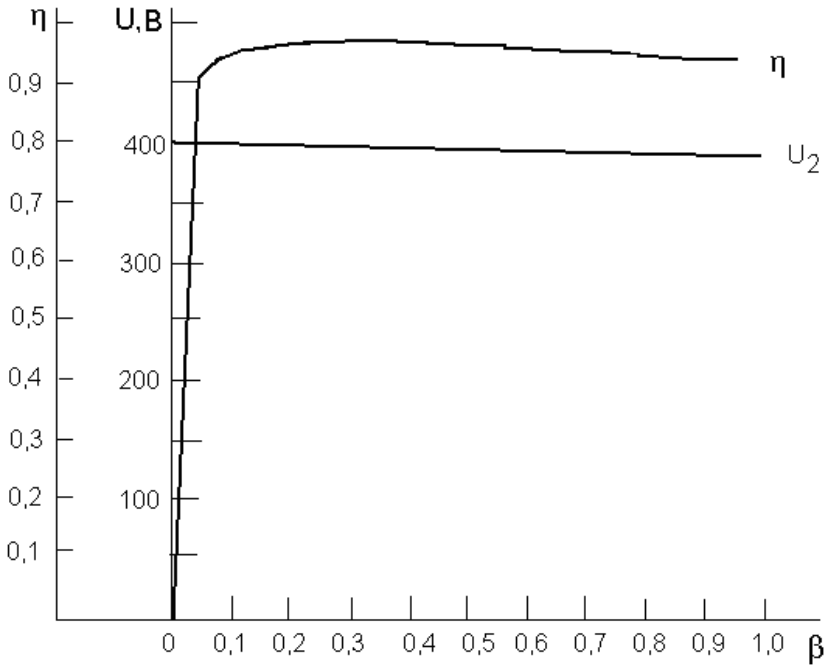


Рис. 4.1 Зависимость КПД и напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора от коэффициента нагрузки

Определим, при какой нагрузке трансформатор имеет максимальный КПД

$\beta_{max} = \sqrt{P_0 / P_K} = \sqrt{2{,}0 / 7{,}3}$ =0,523, при этом η = 0,985.

Задача 2. Для однофазного трансформатора мощностью $S_{НОМ}$ = 0,15 *кВА*, напряжениями 127/6 В при частоте тока сети f =50 Гц, активном сечении сердечника магнитопровода Q_C = 5,0 см^2, магнитной индукции в

сердечнике B_m = 1,1 Тл и КПД равном η = 0,9, определить первичный и вторичный номинальные токи обмоток, коэффициент трансформации, числа витков и диаметры каждой обмотки при плотности тока в обмотках J = 2,5 А/мм^2.

Решение.

Номинальный ток вторичной обмотки:

$I_{2НОМ} = S_{НОМ} / U_{2НОМ} = 0{,}15 \cdot 1000/6 = 25$ А.

Номинальный ток первичной обмотки:

$I_{1НОМ} = S_{НОМ} / (U_{1НОМ} \cdot \eta) = 0{,}15/(127 \cdot 0{,}9) = 1{,}31$ А.

Коэффициент трансформации трансформатора:

$n = U_{1НОМ} / U_{20} = 127/6 = 21$.

Число витков первичной обмотки:

$W_1 = U_1 / (4{,}44 \cdot f \cdot Q_C \cdot B_m) = 127/(4{,}44 \cdot 50 \cdot 5{,}0 \cdot 10^{-4} \cdot 1{,}1) = 1040$

Число витков вторичной обмотки:

$W_2 = U_2 / (4{,}44 \cdot f \cdot Q_C \cdot B_m) = 6/(4{,}44 \cdot 50 \cdot 5{,}0 \cdot 10^{-4} \cdot 1{,}1) = 49$

Сечение проводов обмоток:

первичной $s_1 = I_1 / J = 1{,}31 / 2{,}5 = 0{,}524$ мм^2;

вторичной $s_2 = I_2 / J = 25 / 2{,}5 = 10$ мм^2.

Диаметры проводов:

первичной обмотки $d_1 = 1{,}13 \sqrt{s_1} = 1{,}13 \sqrt{0{,}524} = 0{,}82$ мм.

вторичной обмотки $d_2 = 1{,}13 \sqrt{s_2} = 1{,}13 \sqrt{10} = 3{,}6$ мм.

5. ТРЕХФАЗНЫЕ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Асинхронные электродвигатели (АД) составляют основу электропривода большинства механизмов, используемых во всех отраслях народного хозяйства. АД составляют свыше 90% парка электродвигателей по количеству и около 55 % – по мощности. Они потребляют свыше 60% всей вырабатываемой в стране электроэнергии. Достоинства АД: высокий коэффициент полезного действия, высокая надежность, простота и низкая стоимость конструкции, минимальные затраты на обслуживание. К недостаткам АД следует отнести большие (до $7I_{ном}$) пусковые токи и ограниченные возможности регулирования скорости вращения ротора. В РФ АД общего назначения выпускаются серии: 4А; АИ; 5А; 6А; RA .

5.1. Устройство трехфазного АД

Основными частями машины являются статор и ротор. Статор – неподвижная часть машины. Он состоит из следующих частей:

1. Пакета из штампованных листов электротехнической стали в виде полого цилиндра (магнитопровод) с пазами на внутренней поверхности.

2. Трехфазной обмотки, уложенной в пазы статора.

3. Корпуса, в который запрессован пакет листов статора. Корпус АД выполняется алюминиевым, стальным или чугунным. Статорную обмотку соединяют в «звезду» – $\curlywedge$, или «треугольник» – Δ, для чего начала и концы обмоток выводят на клеммную коробку. Статор служит для создания вращающегося магнитного поля.

Ротор – вращающаяся часть двигателя. Сердечник ротора, так же как и статора, набирают из отдельных листов электротехнической стали. Обмотки укладываются в пазы, расположенные на наружной поверхности ротора.

Ротор бывает двух типов: короткозамкнутый и фазный. Короткозамкнутый ротор имеет обмотку типа «беличьей клетки», т.е. в виде медных или алюминиевых стержней, замкнутых между собой по торцам, фазный ротор имеет обмотку такую же, как на статоре, с тем же числом фаз и пар полюсов. Обмотка фазного ротора всегда соединяется «звездой», причем концы фаз соединяют вместе и изолируют внутри ротора, а начала фаз соединяют с контактными кольцами, насаженными на вал ротора и изолированными от него. На кольца наложены щетки, с помощью которых роторная обмотка соединяется с пусковым реостатом.

Подшипниковые щиты обеспечивают необходимый зазор между статором и ротором (0,5... 4 мм) и предохраняют двигатель от попадания во внутрь посторонних предметов.

5.2. Принцип действия трёхфазного АД

В основе работы АД лежит вращающееся магнитное поле, принцип образования которого изложен в [1] §14.4.

При включении АД в трехфазную сеть на статоре мгновенно образуется вращающееся магнитное поле, которое пересекает неподвижные витки обмотки ротора и наводит в них ЭДС. Так как обмотка ротора замкнута, то под действием наведенной ЭДС в ней течет ток. Взаимодействие тока ротора с магнитным полем статора приводит к образованию вращающегося электромагнитного момента, который приложен к виткам ротора и направлен в ту же сторону, что и вращающееся поле статора. Как только вращающий момент превысит тормозные усилия, ротор начинает разворачиваться и увеличивать скорость вращения. При этом ЭДС и ток ротора уменьшаются. Изменение тока и скорости вращения ротора будет происходить до тех пор, пока не наступит равновесие между вращающим моментом и тормозным.

Ротор двигателя всегда отстает от магнитного поля статора. Это отставание характеризуют величиной, называемой *скольжением* и определяют по формуле

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \qquad (1)$$

где $n_1 = \frac{60 \cdot f}{p}$ - частота вращения магнитного поля статора (синхронная); p – число пар полюсов обмотки статора;

n_2 – частота вращения ротора; f – частота тока сети.

Для промышленной частоты тока f = 50 Гц синхронная частота вращения равна:

при p = 1 n_1 = 3000 об/мин;

при p = 2 n_1 = 1500 об/мин;

при p = 3 n_1 = 1000 об/мин и т.д. до p = 5.

При пуске s = 1, или 100 %, в номинальном режиме s = 0,02 – 0,12 или от 2 до 12 %. Скольжение играет важную роль в оценке механических свойств АД. Чтобы изменить направление вращения ротора АД необходимо поменять местами любых два провода, подходящих к двигателю из сети.

5.3. Выбор схемы соединения обмоток статора

Выводы обмоток статора АД обозначают следующим образом:

С1, С2, С3 – начала обмоток (фаз);

С4, С5, С6 – концы обмоток (фаз) (рис. 5.1 *а)*.

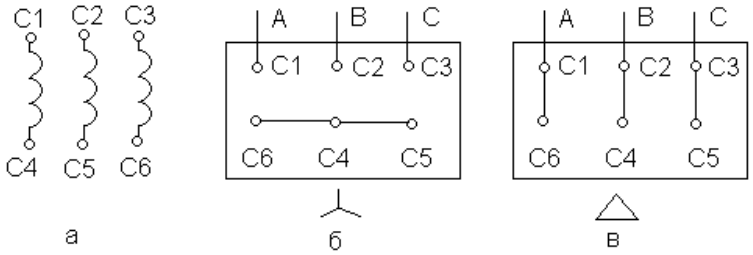


Рис. 5.1. Соединение обмоток статора АД

На клеммной коробке выводы обмоток располагают так, чтобы было можно одними перемычками получить две схемы соединения – звезда или треугольник (рис.5.1 *б, в*).

Очень важно правильно определить схему соединения обмоток, так как от этого зависит длительность работы АД. При правильном соединении двигатель будет работать десятки лет, при неправильном – десятки минут.

При подключении двигателя к сети, к его фазе должно быть приложено меньшее из указанных на щитке АД напряжение.

Если на щитке (в паспорте) АД указано два напряжения и способ соединения обмоток, например: 380/220 В, ⅄/Δ или 660/380 В, ⅄/Δ, то эту запись следует понимать так. Если линейное напряжение сети, в которую включается АД равно меньшему напряжению, указанному на щитке двигателя, то обмотка статора должна быть соединена по схеме «треугольник». Если линейное напряжение сети равно большему напряжению, указанному на щитке двигателя, то обмотка статора должна быть соединена по схеме «звезда». Например, обмотка статора двигателя, на щитке которого указано 380/220 В, ⅄ /Δ при включении в сеть 380/220 В должна быть соединены по схеме «звезда», так как линейное напряжение сети (380 В) равно большему напряжению, указанному на щитке АД. А двигатель с напряжениями 660/380 В должен включаться в ту же сеть по схеме «треугольник».

На своем корпусе все АД имеют паспортную табличку, в которой указаны основные номинальные данные: тип двигателя; его номинальная механическая мощность на валу $P_{ном}$, кВт; частота (или скорость) вращения ротора при номинальной мощности на валу $n_{ном}$, об/мин (или ω, c^{-1}), напряжение, ток, схемы соединения обмоток, КПД, cos φ и др. данные.

5.4. Механическая характеристика АД

Основной характеристикой АД является механическая характеристика. Это зависимость частоты вращения ротора от момента на валу АД, n = f (M) рис. 5.2. Устойчивая работа двигателя возможна на участке $M < M_{кр}$ и $n > n_{кр}$. С достаточной для практики точностью, устойчивая часть механической характеристики может быть построена по формуле:

$$M = \frac{2 \cdot M_{кр}}{\frac{S}{S_к} + \frac{S_к}{S}}, \qquad (2)$$

где $M_{кр}$ – максимальный (критический) момент АД, Нм,

$$S_R = S_H (m_R + \sqrt{m_K^2 - 1}),$$

где $m_к = M_{кр}/M_н$ – кратность максимального момента (1,7…, 2,2), приводится в справочниках;

$s_н$ - номинальное скольжение АД, приводится в справочниках.

Задаваясь текущими значениями скольжения s от нуля до $s_к$, вычисляют по формуле (2) соответствующие им значения момента M.

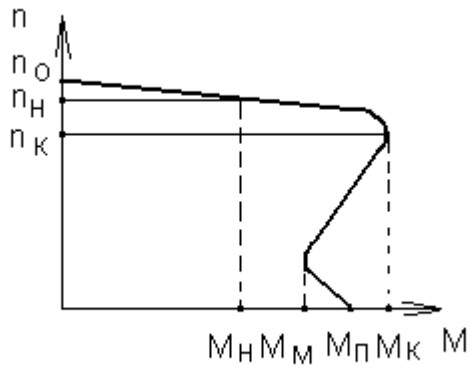


Рис.5.2. Механическая характеристика АД

Неустойчивая часть механической характеристики, участок от $M_п$ до $M_к$ может быть построена приближенно, используя две дополнительные точки, а именно точку пускового момента

$$M_п = m_п \cdot M_н \quad (4)$$

и точку минимального момента при пуске

$$M_м = m_м \cdot M_н , \quad (5)$$

где $m_п$ и $m_м$ – кратности пускового и минимального момента соответственно, приводятся в справочниках по АД.

Номинальный момент АД определяется по формуле

$$M_н = \frac{9550 \cdot P_н}{n_н} \text{ Нм}, \quad (6)$$

где $P_н$ – номинальная (паспортная) мощность АД в кВт,

$n_н$ – номинальная частота вращения ротора АД, об/мин.

Механическая характеристика АД на участке от режима холостого хода до номинального момента практически линейна и может быть построен по двум точкам с координатами: 1) $n = n_1$; $M = 0$; 2) $n = n_{ном}$; $M = M_{ном}$.

Естественная механическая характеристика АД в пределах момента от нуля до номинального режима – жесткая, так как изменение момента на валу на этом участке приводит к незначительным (всего несколько процентов) изменениям частоты вращения ротора.

Примеры решения задач по асинхронным двигателям

Задача 1. Номинальная мощность трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором $P_{НОМ}$ = 40 кВт, номинальное напряжение

$U_{НОМ}$,= 380 В, номинальная частота вращения ротора $n_{НОМ}$ = 980 об/мин, номинальный КПД $\eta_{НОМ}$ = 91,5 %, номинальный коэффициент мощности $cos\varphi$= 0,91, число пар полюсов обмотки статора p = 3, кратность пускового тока $\beta = I_{ПУСК} / I_{НОМ}$ равна 5; кратность пускового момента $\delta = M_{ПУСК} / M_{НОМ}$ равна 1,1; кратность максимального момента $\lambda = M_{MAX} / M_{НОМ}$ равна 1,8.

Определить: мощность, потребляемую из сети $P_{1НОМ}$, номинальный $I_{НОМ}$ и пусковой $I_{ПУСК}$ токи, частоту вращения магнитного поля статора n_1, номинальное $s_{НОМ}$ и критическое $s_{КР}$ скольжение, номинальный, максимальный и пусковой моменты двигателя. Построить механическую характеристику $M = f(n)$.

Решение. Мощность потребляемая двигателем из сети:

$P_{1НОМ} = P_{НОМ} / \eta_{НОМ}$ = 40 / 0,915 = 43,72 кВт.

Номинальный ток двигателя:

$I_{НОМ} = P_{НОМ}/(\sqrt{3} \cdot U_{СЕТИ} \cdot cos\varphi \cdot \eta)$ = $40 \cdot 10^3$ /(1,73·380·0,915·0,91) = 72,8 А.

Пусковой ток двигателя:

$I_{ПУСК} = \beta \cdot I_{НОМ}$ = 5·72,8 = 364 А.

Частота вращения магнитного поля статора:

$n_1 = 60 \cdot 50 / p$ = 3000/3 = 1000 об/мин.

Номинальное скольжение двигателя:

$s_{НОМ} = (n_1 - n_{НОМ}) / n_1$ =(1000 – 980)/1000 = 0,02, (2 %).

Критическое скольжение:

$s_{КР} = s_{НОМ}(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1})$ = 2(1,8 + $\sqrt{2^2 - 1}$) = 7,06 %, (0,0706).

Номинальный момент:

$M_{НОМ} = 9559 \cdot P_{НОМ} / n_{НОМ}$ = 9550·40/980 = 390 Нм.

Пусковой момент:

$M_{ПУСК} = \delta \cdot M_{НОМ}$ = 1,1·390 = 429 Нм.

Максимальный момент двигателя:

$M_{MAX} = \lambda \cdot M_{НОМ}$ = 1, 8 · 390 = 702 Нм.

Для построения устойчивой части механической характеристики асинхронного двигателя воспользуемся уравнением:

$M = 2M_{КР} / (s_{КР} / s + s / s_{КР})$,

где $M_{КР}$ – критический (максимальный) момент двигателя при критическом скольжении $s_{КР}$.

Подставив известные величины получим:

M = 2·702 / (0,0706/s + s/ 0,0706).

Задаваясь скольжением в пределах от 0 до 0,0706 вычислим вращающий момент. Обычно шаг расчета принимают равным 0,1· $s_{КР}$.

Частоту вращения ротора, при этом, можно определить по формуле:

$n = n_1(1 - s)$.

Расчетные данные приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

№ п/п	*s*	*n, об/мин*	*M, нм*
1	0,00706	993	139
2	0,01412	986	270
3	0,02118	979	387
4	0,02824	972	484
5	0,0353	965	562
6	0,04236	958	619
7	0,04942	951	659
8	0,05648	944	685
9	0,06354	936	699
10	0,0706	929	702
11	1,0	0	429

Механическая характеристика трехфазного асинхронного двигателя *M=f(n)*, построенная по данным табл.5 приведена на рис.5.4. Не рабочая (не устойчивая) часть механической характеристики показана пунктиром.

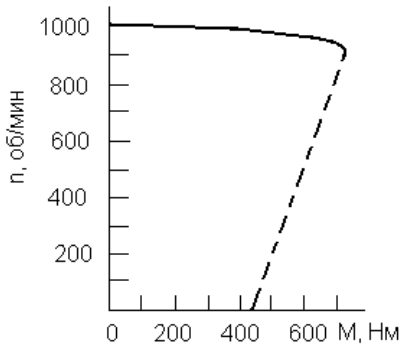


Рис.5.3. Зависимость частоты вращения ротора асинхронного двигателя от момента на валу.

Задача 2. Асинхронный трехфазный двигатель имеет следующие номинальные данные: мощность $P_{НОМ}$ *=3 кВт*; номинальные напряжения *380/220 В*; схемы соединения обмоток статора *Y/Δ*; линейное напряжение сети $U_{СЕТИ}$ *= 380 В*; частота вращения ротора $n_{НОМ}$ *= 953 об/мин*; *КПД 81 %*; *cosφ = 0,76*; кратность пускового тока $\beta = I_{ПУСК} / I_{НОМ}$ равна *6*; кратность пускового момента $\delta = M_{ПУСК} / M_{НОМ}$ равна 2; кратность максимального момента $\lambda = M_{MAX} / M_{НОМ}$ равна *2,2*. Определить: схему соединения обмоток статора звезда Y или треугольник Δ; номинальный $I_{НОМ}$ и пусковой $I_{ПУСК}$ токи; номинальный $M_{НОМ}$ и пусковой $M_{ПУСК}$ моменты. Выбрать сечение алюминиевых проводов, проложенных в трубе, для подключения двигателя к сети. Рассчитать и выбрать

предохранитель для защиты двигателя от коротких замыканий при легком и тяжелом пуске.

Решение.

Так как линейное напряжение сети равно большему напряжению, указанному на щитке двигателя то фазы обмотки статора должны быть соединены по схеме звезда. (В вариантах, где линейное напряжение сети равно меньшему напряжению, указанному на щитке двигателя то фазы обмотки статора должны быть соединены по схеме треугольник).

Номинальный ток двигателя:

$I_{НОМ} = P_{НОМ}/(\sqrt{3}\cdot U_{СЕТИ}\cdot cos\varphi\cdot\eta)$ = 3000/(1,73·380·0,76·0,81) = 7,4 А.

Пусковой ток двигателя: $I_{ПУСК} = \beta\cdot I_{НОМ}$ = 6·7,4 = 44,4 А.

Номинальный момент:

$M_{НОМ} = 9559\cdot P_{НОМ}/n_{НОМ}$ = 9550·3,0/953 = 30 Нм.

Пусковой момент: $M_{ПУСК} = \delta\cdot M_{НОМ}$ = 2·30 = 60 Нм.

Для подключения двигателя к сети необходимы три алюминиевых провода, проложенные в металлической трубе, допустимый ток каждого из которых больше или равен номинальному току двигателя. Из табл. 5.2 для нашего примера выбираем провод сечением 2,5 мм^2, допустимый ток которого равен 19 А, что больше номинального тока, равного 7,4 А.

Таблица 5.2

Допустимые токи на алюминиевые провода проложенные в трубе

$S_{ПРОВ}$, мм^2	2,5	4,0	6,0	10,0	16,0	25,0	35,0	50,0	70
$I_{ДОП}$, А	19	28	32	47	60	80	95	130	165

Предохранитель для защиты двигателя от коротких замыканий выбирают по двум условиям. Сначала рассчитывают ток плавкой вставки предохранителя. При легком пуске ток плавкой вставки рассчитывают по формуле: $I_{ПЛ.ВСТ.} = I_{ПУСК}/2,5$ = 44,4/2,4 = 17,76 А.

При тяжелом пуске (центрифуги, транспортеры, конвейеры, и т.п.) ток плавкой вставки рассчитывают по формуле:

$I_{ПЛ.ВСТ.} = I_{ПУСК}/1,6\ldots2,0)$ = 44,4/2 = 22,2 А.

По табл. 5.3 выбираем предохранитель, ток которого равен или больше тока плавкой вставки. В нашем примере при легком пуске выбираем предохранитель ПРС – 25 с номинальным током 25 ампер и стандартной плавкой вставкой на 20 А. При тяжелом пуске выбираем предохранитель ПРС – 25 с номинальным током 25 ампер и стандартной плавкой вставкой на 25 А.

Таблица 5.3

Технические данные предохранителей

Тип	Номин. напря жение,В	Ном. ток предохр., А	Номинальный ток Плавких вставок, А	Область применения
ПРС	380	10	1; 2; 4; 6,3; 10	Для защиты от коротких замыканий электрооборудования и сетей.
		25	4; 6,3; 10; 16; 20; 25	
		63	20; 25; 40; 63	
ППН-33	380, 500	160	2; 4; 6; 8; 10; 12;16; 25; 32; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160	Для защиты от коротких замыканий промышленных установок и электрических сетей

6. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА (МПТ)

6.1. Методические указания.

МПТ широко используются в качестве электродвигателей (ДПТ) и генераторов (ГПТ). Устройство ДПТ и ГПТ сходны и зависят от способов (схем) возбуждения. Всего применяется четыре схемы возбуждения: независимое, параллельное (шунтовое), последовательное (сериесное) и смешанное (компаундное). МПТ обратимы , т.е. могут работать в режиме ДПТ или режиме ГПТ.

В режиме ДПТ якорь двигателя и обмотка возбуждения подключается к сети постоянного тока, в результате двигатель развивает номинальный момент вращения равный:

$$M_H = C_M \times \Phi_H \times I_{я.н.}\ Нм,$$

где $C_М$ - коэффициент Д.П.Т., зависящий от величины его исполнения;

$\Phi_Н$ - номинальный магнитный поток полюса;

$I_{я.н.}$ - номинальный ток обмотки якоря, который определяется по формуле:

$$I_{я.н.} = P_Н / (U_Н \times \eta_Н)\ A,$$

где $P_Н, U_Н$ - номинальные значения мощности в кВт и напряжения в вольтах;

$\eta_Н$ - номинальный КПД.

В режиме ГПТ якорь вращается первичным двигателем, при этом обмотка возбуждения подключается к источнику постоянного тока (или

используется принцип самовозбуждения за счет остаточного намагничивания полюсов и дальнейшего усиления магнитного потока возбуждения). В этом случае ГПТ вырабатывает ЭДС равную: $E_я = C_e \times n \times \Phi$,

где C_e - коэффициент, зависящий от исполнения ГПТ; n – частота вращения оборотов якоря; Ф – магнитный поток возбуждения.

Задача. Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением (рис.6.1), с номинальным напряжением $U_Н$=220В, $P_Н$=10кВт, $\eta_Н$=85,5%, $n_Н$ =970 об/мин. Потери мощности в цепи якоря $\Delta P_Я$ = 5,2% и в цепи возбуждения $\Delta P_В$=4,2% от потребляемой мощности двигателя $P_{1Н}$. Определить: ток в цепи возбуждения $I_{ВН}$, ток цепи якоря $I_{Я.Н.}$, номинальный вращающий момент ДПТ $M_Н$, пусковой момент двигателя $M_П$ при условии, что $I_П/I_{ЯН}$=2,5.

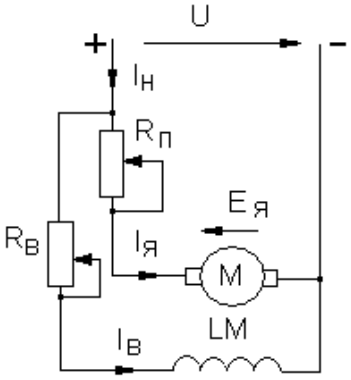


Рис.6.1. Схема ДПТ с параллельным возбуждением

Решение.

Номинальная потребляемая мощность двигателя:

$$P_{1Н} = \frac{P_Н}{\eta_Н} = \frac{10}{0{,}855} = 11{,}965\,кВт;$$

Номинальный потребляемый ток: $I_{1Н} = \frac{P_{1Н} \cdot 10^3}{U_Н} = \frac{11{,}695 \cdot 10^3}{220} = 53{,}16\,А;$

Сила тока в цепи возбуждения:

$$I_{ВН} = \frac{\Delta P_В}{U_Н} = \frac{P_{1Н} \cdot 0{,}042}{220} = \frac{11{,}695 \cdot 0{,}042}{220} = 2{,}23\,А;$$

Сила тока в цепи якоря:

$$I_{ЯН} = \frac{\Delta P_Я}{U_Н} = \frac{P_{1Н} \cdot 0{,}052}{220} = \frac{11{,}695 \cdot 0{,}052}{220} = 2{,}76\,А;$$

Номинальный момент двигателя: $M_Н = 9550 \cdot \frac{P_Н}{n_Н} = 9950 \cdot \frac{10}{970} = 98{,}4 \quad Нм;$

Пусковой момент двигателя, с учетом условия: $\frac{M_Н}{M_П} = \frac{I_{ЯН}}{I_П} = 2{,}5$:

$M_П = M_Н \cdot 2{,}5 = 98{,}4 \cdot 2{,}5 = 246$ Н*м*.

Определяем механические и магнитные потери мощности в двигателе:

$\Delta P_{мех} + \Delta P_{маг} = \sum \Delta P - \Delta P_{эл} = 1{,}965 - 1{,}099 = 0{,}866$ кВт,

где $\sum \Delta P = P_{1Н} - P_Н = 11{,}965 - 10 = 1{,}965$ кВт –

общие потери мощности двигателя,

$\Delta P_{эл} = \Delta P_Я + P_В = 608{,}14 + 491{,}19 = 1099{,}33$ Вт.

1. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

7.1. Выпрямители

Задача. Мощность нагрузки P_0 = 6 *кВт*, выпрямленный ток I_0 = 150 *А*.

Выбрать схему выпрямления; рассчитать недостающие параметры, выбрать вентили и трансформатор для выпрямителя. Начертить схему выпрямителя.

Решение:

Мощность нагрузки 6 *кВт*, т.е. больше 2-х *кВт*, следовательно выбираем 3-х фазную схему выпрямления мостовую (ТМС), рис. 7.1.

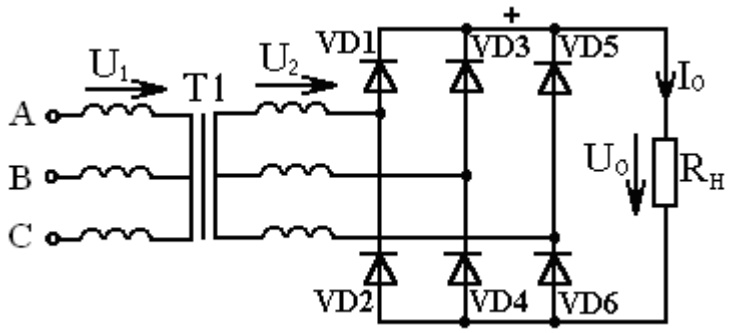


Рис. 7.1. Трехфазная мостовая схема выпрямления

Определяем выпрямленное напряжение (постоянное) на нагрузке:

$$U_0 = \frac{P_0}{I_0} = \frac{6000}{150} = 40B$$

Параметры (диодов) вентилей для схемы ТМС:

а) Ток вентиля: $I_a = \frac{I_0}{3} = \frac{150}{3} = 50A$

b) Допустимое обратное напряжение вентиля:

$$U_{обр.макс.} = 1{,}05 \cdot U_0 = 1{,}05 \cdot 40 = 42B$$

По I_a=50A и $U_{обр.макс.}$ = 42B выбираем по справочнику вентили на ток равный или ближайший больший ток по сравнению с I_a=50A, то же для напряжения выбираем на напряжение равное или ближайшее большее чем $U_{обр.макс.}$ = 42B. Например, подходят вентили ВК – 50 – 05 (50А; 50В; вентили кремниевые).

Сопротивление нагрузки:

$$R_H = \frac{U_0}{I_0} = \frac{40}{150} = 0{,}266Ом$$

Фазное напряжение вторичной обмотки трансформатора:

т.к. $U_0 = 2{,}34 \cdot U_2$ то $U_2 = \frac{U_0}{2{,}34} = \frac{40}{2{,}34} = 17{,}1B \approx 18B$

U_2 – принимаем стандартное значение 18B.

U_1 – принимаем стандартное значение 220B, тогда линейное будет 380B. Это наша сеть.

Коэффициент трансформации трансформатора $n = \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{18} = 12{,}2$

Вторичный ток трансформатора:

т.к. для ТМС $\frac{I_2}{I_0} = 0{,}82$, то $I_2 = 0{,}82 \cdot I_0 = 0{,}82 \cdot 150 = 123A$

Первичный ток трансформатора: $\frac{I_2}{n} = \frac{123}{12{,}2} = 10A$

Мощность трансформатора для ТМС:

$$P_{тр} = 1{,}05 \cdot P_0 = 1{,}05 \cdot 6 = 6{,}3кВт$$

1.2. Усилительные и генераторные устройства

В данном разделе студенту предлагается подготовить реферат на тему указанную в таблице заданий. В реферате должно быть отражено: определение электронного устройства; его применение; принцип действия; принципиальная электрическая схема.

7.3. Логические элементы

Логические элементы (ЛЭ) вместе с запоминающими элементами составляют основу устройств цифровой (дискретной) обработки информации- вычислительных машин, цифровых измерительных приборов, устройств автоматики и связи. Логические элементы

выполняют простейшие логические операции над цифровой информацией, а запоминающие элементы служат для ее хранения.

ЛЭ чаще всего строят на базе электронных устройств, работающих в ключевом режиме. Поэтому цифровую информацию обычно представляют в двоичной форме, в которой сигналы принимают только два значения: «0» (логический нуль) и «1» (логическая единица), соответствующие двум состояниям ключа.

В алгебре логики доказывается, что любое сложное логическое преобразование можно произвести, используя всего три элементарные логические операции:

1. Логическое сложение (дизъюнкция), операция ИЛИ, обозначаемая знаками «+» или «v». $Y = X_1 + X_2 + ...X_n$

Эта запись читается так: если на входе ЛЭ X_1 ИЛИ X_2 ИЛИ ...X_n = 1, то на выходе ЛЭ Y = 1.

2. Логическое умножение (конъюнкция), операция И, обозначаемая знаками «·» или «^». $Y = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot ....X_n$.

Эта запись читается так: если на входе ЛЭ X_1 И X_2 И X_3 И ...X_n = 1, то на выходе ЛЭ Y = 1.

3. Логическое отрицание (инверсия), операция НЕ, обозначаемая чертой над переменной. $Y = \bar{X}$. Читается так: Y НЕ X.

Работу ЛЭ принято описывать с помощью таблицы истинности. В ней указываются все возможные значения входных переменных ЛЭ и состояние на его выходе в соответствии с выполняемой элементом логической функцией. Таблицы истинности для простейших ЛЭ с двумя переменными имеют вид:

Операция ИЛИ

X_1	X_2	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Операция И

X_1	X_2	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Операция НЕ

X	Y
0	1
1	0

В общем случае ЛЭ имеет m входов и один выход. На структурных и функциональных схемах логические элементы изображают в виде прямоугольников, на которых показывают вид выполняемой операции. Логический элемент ИЛИ обозначаю цифрой 1, логический элемент И обозначают знаком &, логически элемент НЕ цифрой 1 и кружком со стороны выхода схемы. На рис.7.2 (а, б, в) приведены обозначения ЛЭ соответственно ИЛИ, И, НЕ.

На практике широко применяют комбинированные ЛЭ, реализующие две (и более) логические операции, рис. 7.3 (а, б).

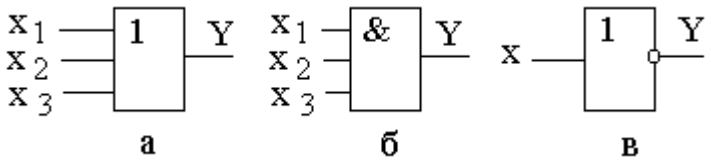


Рис. 7.2. Обозначения логических элементов на структурных схемах: а) ИЛИ; б) И; в) НЕ.

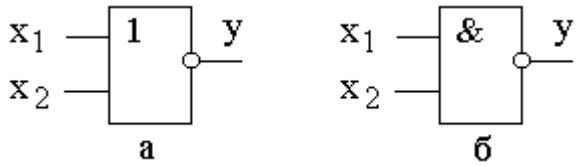


Рис.7.3. Обозначения логических элементов на структурных схемах: а) ИЛИ-НЕ; б) И-НЕ.

Логические функции и таблицы истинности комбинированных ЛЭ имеют вид:

Тип элемента	Логическая функция	Таблица истинности		
ИЛИ – НЕ	$Y = \overline{X_1 + X_2}$	X_1	X_2	Y
		0	0	1
		0	1	0
		1	0	0
		1	1	0
И – НЕ	$Y = \overline{X_1 \cdot X_2}$	X_1	X_2	Y
		0	0	1
		0	1	1
		1	0	1
		1	1	0

Имеются и другие, реже применяемые ЛЭ.

ЛЭ используются в различных устройствах цифровой техники: триггерах; счетчиках импульсов; регистрах; шифраторах; дешифраторах и др.

В задании по логическим элементам необходимо определить уровни сигналов на выходе электронного устройства при заданных входных сигналах.

2. ВАРИАНТЫ КОНТРОЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ

8.1. Линейные цепи постоянного тока

8.1.1. Анализ простых цепей постоянного тока

Задача. Цепь постоянного тока содержит несколько резисторов, соединенных смешанно. Схема цепи с указанными сопротивлениями приведена на соответствующем рисунке. Номер рисунка, заданные значения одного из напряжений или токов и величина, подлежащая определению, приведены в табл. 8.1. Всюду индекс тока или напряжения совпадает с индексом резистора, по которому проходит ток или на котором действует это напряжение. Например, через резистор R3 проходит ток I_3 и на нем действует напряжение U_3. Определить также мощность, потребляемую всей цепью, и расход электрической энергии цепью за 8 часов работы.

Пояснить характер изменения электрической величины, заданной в таблице вариантов (увеличится, уменьшится, останется неизменной), если один из резисторов замкнуть накоротко или выключить из схемы. При этом считать источник ЭДС E идеальным (напряжение U на входе цепи неизменным). При трудностях логических пояснений ответа можно выполнить расчет требуемой величины в измененной схеме и на основании сравнения ее в двух схемах дать ответ на вопрос.

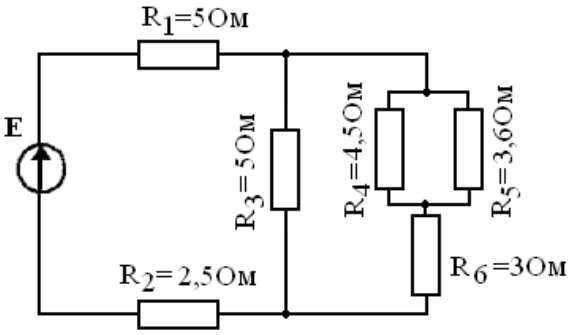


Рис.8.1

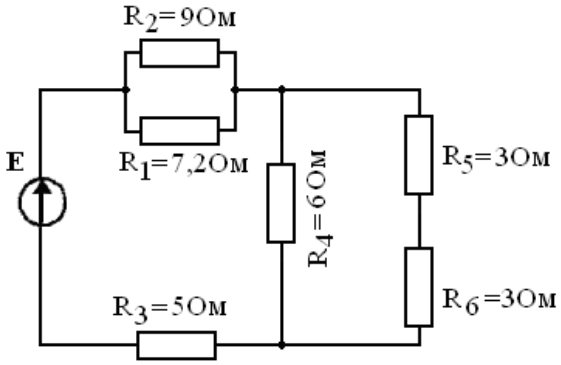


Рис.8.2

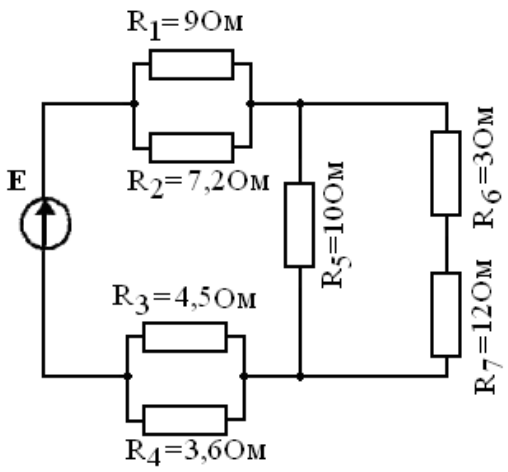


Рис.8.3

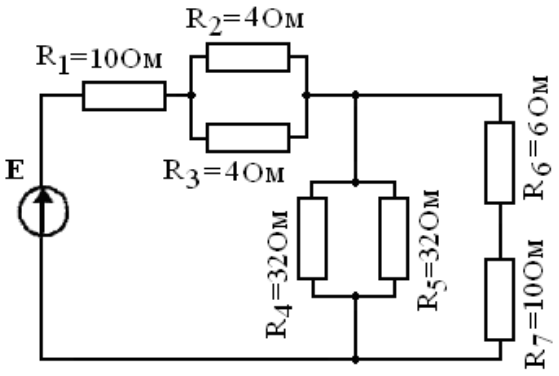


Рис.8.4

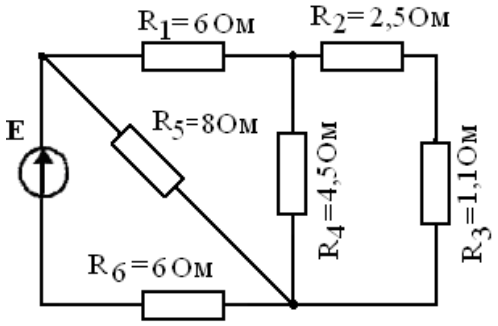


Рис.8.5

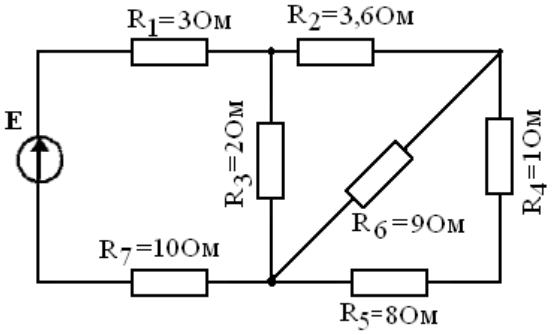


Рис.8.6

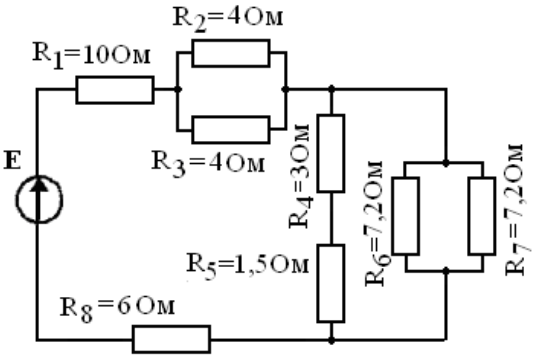


Рис.8.7

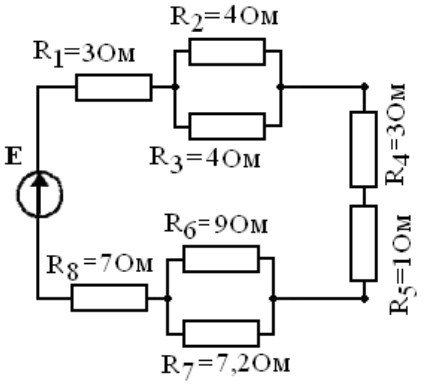


Рис.8.8

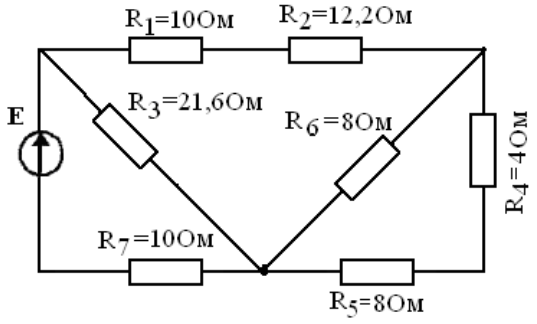


Рис.8.9

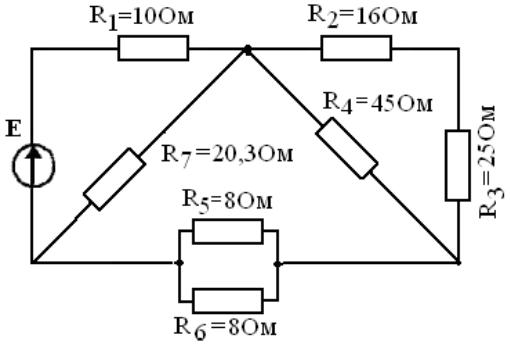


Рис.8.10

Таблица 8.1

Вари - ант №	Рису - нок №	Дано	Опре де лить	Действие с резистором		Провести анализ изменения величины
				Замкнут накоротк о	Выключен из схемы	
01	8.1	E= 40 В	I_1		R_5	U_1
02	8.1	I_1= 2 А	E	R_6		U_3
03	8.1	U_1= 40 В	I_6		R_3	I_6
04	8.1	I_2= 4 А	E	R_1		U_5
05	8.1	I_3= 8 А	E		R_4	I_2
06	8.2	E= 120 В	I_3	R_5		I_3
07	8.2	I_3= 20 А	E		R_1	U_2
08	8.2	U_2= 160 В	I_4	R_3		U_4
09	8.2	U_4= 36 В	E		R_4	I_2
10	8.2	I_1= 10 А	E	R_6		U_3
11	8.3	E=240 В	U_5		R_2	U_7
12	8.3	U_1= 90 В	E	R_7		I_1
13	8.3	I_5= 30 А	I_1		R_3	U_2
14	8.3	U_3= 10 В	U_7	R_6		I_4
15	8.3	E= 160 В	I_5		R_5	U_1
16	8.4	E= 200 В	I_1	R_6		U_4
17	8.4	I_1= 5 А	E		R_2	I_7
18	8.4	U_7= 50 В	I_3	R_7		U_1
19	8.4	U_1=200 В	I_7		R_5	I_1
20	8.4	I_6= 6 А	U_1	R_5		U_3
21	8.5	I_6= 20 А	E		R_4	U_6
22	8.5	E= 50 В	U_3	R_1		I_5
23	8.5	U_4= 90 В	I_6		R_5	U_1
24	8.5	I_2= 10 А	E	R_6		I_2
25	8.5	E= 300 В	I_3	R_3		I_6
26	8.6	E= 140 В	I_7		R_6	U_3
27	8.6	I_6= 10 А	E	R_7		I_2
28	8.6	U_5= 8 В	I_1		R_3	U_7
29	8.6	E= 280 В	U_6	R_2		I_1
30	8.6	I_7= 10 А	E	R_1		U_3
31	8.7	E= 200 В	I_8		R_7	I_1
32	8.7	U_8= 30 В	E	R_4		U_5
33	8.7	I_1= 20 А	U_6		R_3	U_8
34	8.7	E= 100 В	I_7	R_8		I_6
35	8.7	U_5= 15 В	U_8		R_4	U_2

Окончание табл. 8.1

Вари - ант №	Рису - нок №	Дано	Опре де лить	Действие с резистором		Провести анализ изменения величины
				Замкнут накоротк о	Выключен из схемы	
36	8.8	E= 400 В	U_1		R_3	I_8
37	8.8	I_8= 10 А	I_2	R_4		U_2
38	8.8	U_3= 60 В	E		R_7	I_4
39	8.8	E= 600 В	I_8	R_5		U_8
40	8.8	U_4= 80 В	E	R_8		I_1
41	8.9	E= 50 В	I_7		R_3	U_5
42	8.9	I_7= 4 А	U_1	R_5		I_7
43	8.9	U_6= 80 В	E	R_2		U_3
44	8.9	I_5= 12 А	U_7		R_6	I_4
45	8.9	E= 200 В	U_3	R_7		U_6
46	8.10	I_1= 5,5 А	U_7		R_4	I_7
47	8.10	E= 210 В	I_1		R_7	U_4
48	8.10	U_1= 210 В	E	R_2		I_1
49	8.10	U_7= 220 В	I_1		R_5	U_1
50	8.10	E= 105 В	U_4	R_1		I_5

8.1.2. Анализ сложных цепей постоянного тока

Задача. Для электрической цепи, значения ЭДС источников и сопротивлений приемников которой приведены в соответствующем варианте задания табл. 8.2 выполнить следующее:

1.Составить уравнения для определения токов путем непосредственного применения законов Кирхгофа (указав, для каких узлов и контуров эти уравнения записаны). Решать эту систему уравнений не следует.

2.Определить токи в ветвях методом контурных токов.

3. Определить режимы работы активных элементов и составить баланс мощностей.

4. Провести проверку правильности решения задачи по второму закону Кирхгофа

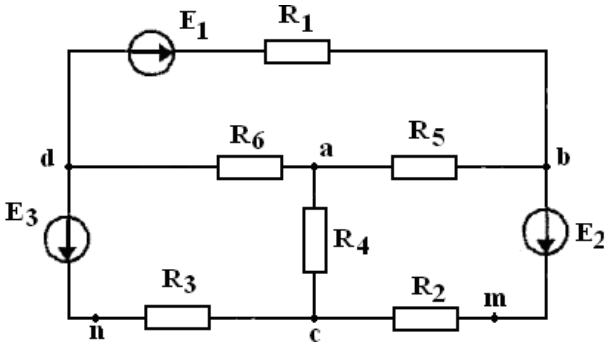


Рис.8.11

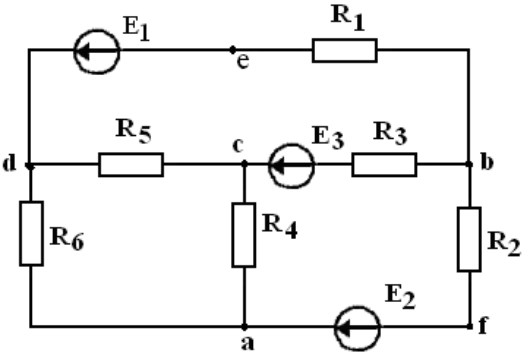


Рис.8.12

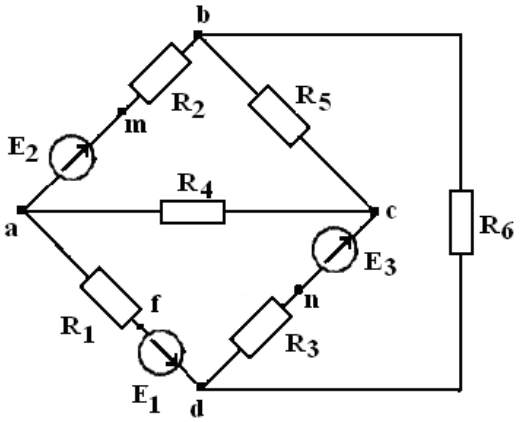


Рис.8.13

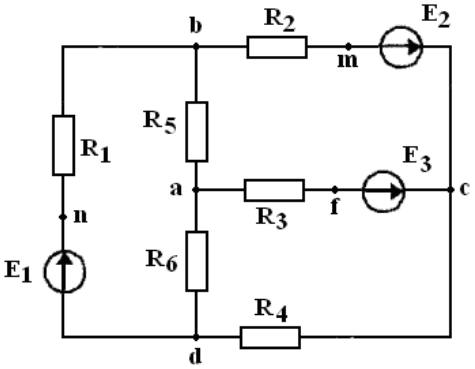


Рис.8.14

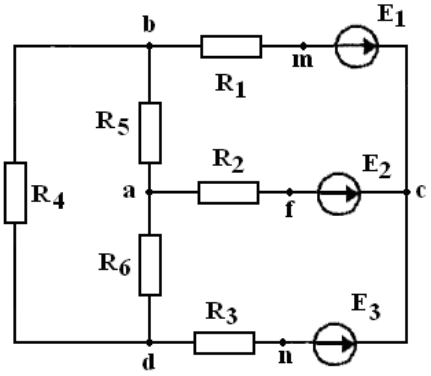


Рис.8.15

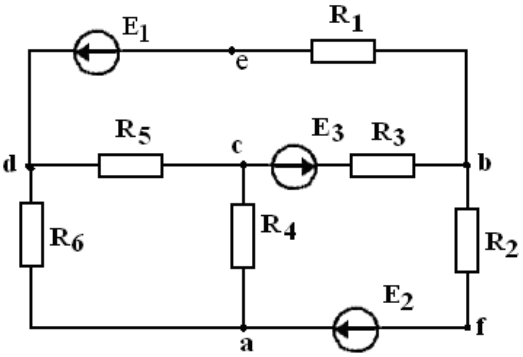


Рис.8.16

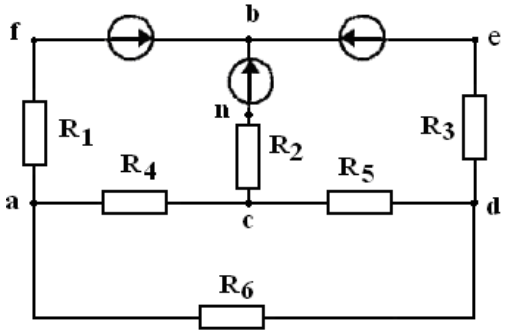


Рис.8.17

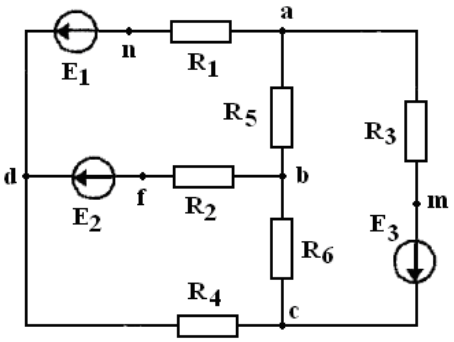


Рис.8.18

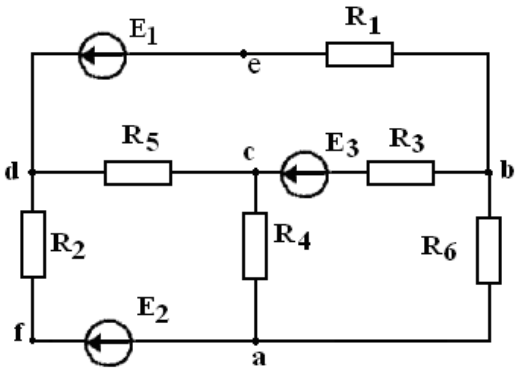


Рис.8.19

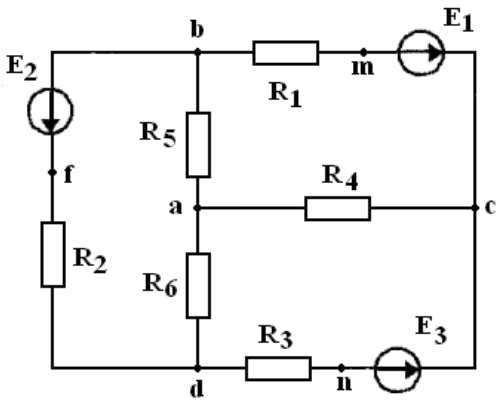


Рис.8.20

Таблица 8.2.

Вар. №	Рис. №	E_1, *В*	E_2, *В*	E_3, *В*	R_1, *Ом*	R_2, *Ом*	R_3, *Ом*	R_4, *Ом*	R_5, *Ом*	R_6, *Ом*
1	8.11	25	-	15	4	3	2	5	4	3
2	8.11	-	20	10	5	4	3	4	3	2
3	8.11	100	34	-	11	16	5	8	3	10
4	8.11	50	-	20	8	10	15	12	16	8
5	8.11	80	40	-	6	11	17	12	14	20
6	8.12	120	-	36	12	16	8	10	12	15
7	8.12	-	40	80	10	16	12	17	20	14
8	8.12	45	-	20	14	12	19	16	3	8
9	8.12	85	30	-	7	10	8	11	14	20
10	8.12	-	100	50	20	15	16	18	15	10
11	8.13	110	-	60	12	16	10	8	14	12
12	8.13	140	120	-	20	24	25	28	30	14
13	8.13	76	34	-	15	18	12	10	8	6
14	8.13	-	60	80	8	6	7	5	12	14
15	8.13	150	-	80	14	16	18	14	12	10
16	8.14	120	100	-	21	25	20	26	22	20
17	8.14	-	40	60	8	12	15	20	6	4
18	8.14	60	80	-	12	10	15	17	13	14
19	8.14	110	-	65	10	14	15	14	16	18
20	8.14	-	100	50	18	20	22	12	14	10
21	8.15	120	80	-	12	15	14	16	18	12
22	8.15	120	-	60	20	15	14	18	12	16
23	8.15	-	60	80	15	16	12	15	14	18
24	8.15	30	90	-	7	6	9	8	6	8
25	8.15	100	-	36	6	4	6	8	4	10
26	8.16	60	-	80	10	10	16	18	15	20
27	8.16	-	140	160	25	20	24	26	23	22

Окончание табл. 8.2

Вар. №	Рис. №	E_1, *В*	E_2, *В*	E_3, *В*	R_1, *Ом*	R_2, *Ом*	R_3, *Ом*	R_4, *Ом*	R_5, *Ом*	R_6, *Ом*
28	8.16	140	120	-	18	11	16	16	14	12
29	8.16	-	160	140	20	22	20	24	18	16
30	8.16	100	-	150	16	20	22	28	10	14
31	8.17	86	90	-	14	10	16	12	15	20
32	8.17	-	32	80	10	16	18	12	14	10
33	8.17	50	-	70	8	12	18	12	10	14
34	8.17	120	160	-	20	28	22	20	25	18
35	8.17	-	120	160	16	18	13	16	10	20
36	8.18	150	50	-	6	4	3	8	8	6
37	8.18	46	-	88	4	9	6	7	3	8
38	8.18	-	120	60	21	22	26	20	18	25
39	8.18	40	100	-	10	8	12	10	14	10
40	8.18	-	32	80	8	10	7	15	9	11
41	8.19	120	80	-	22	18	16	24	26	21
42	8.19	-	60	120	21	24	22	15	18	18
43	8.19	80	140	-	18	20	16	14	22	14
44	8.19	120	-	50	11	15	12	16	18	12
45	8.19	-	100	50	8	10	15	12	22	16
46	8.20	130	62	-	14	22	21	18	15	10
47	8.20	-	40	100	8	16	10	14	22	15
48	8.20	150	-	120	15	20	12	16	18	22
49	8.20	50	120	-	8	12	20	25	10	8
50	8.20	-	140	70	14	14	14	16	12	18

8.2. Однофазные цепи переменного тока

Задача 1. Напряжение на зажимах цепи, вариант которой соответствует последней цифре учебного шифра студента и изображенной на рис. 8.21, изменяется по закону $u=U_m \sin\omega t$. Амплитудное значение напряжение U_m, значения активных сопротивлений R_1 и R_2, индуктивностей катушек L_1 и L_2, емкостей конденсаторов C_1 и C_2 приведены в табл. 8.3. Частота питающего напряжения f = 50 Гц.

Необходимо: Изобразить электрическую цепь, согласно заданным параметрам сопротивлений и определить: полное сопротивление Z; напряжение U, приложенное к цепи; ток I; угол сдвига фаз φ (по величине и знаку); активную P, реактивную Q и полную S мощности цепи.

Определить закон изменения тока в цепи. Определить характер (индуктивность, емкость) и параметры элемента, который должен быть включен в электрическую цепь для того, чтобы в ней наступил резонанс напряжений. Указать способ включения этого элемента. Пояснить характер изменения (увеличится, уменьшится, останется без изменения) тока, активной и реактивной мощности в цепи при увеличении частоты тока в два раза. Напряжение, приложенное к цепи, считать неизменным.

Начертить в масштабе векторную диаграмму цепи и пояснить ее построение.

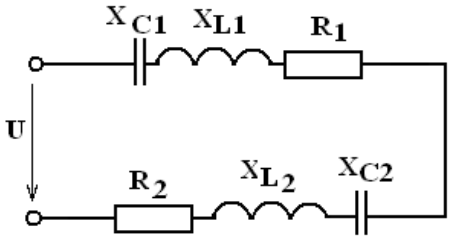


Рис.8.21

Таблица 8.3.

Заданны параметры	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U_m, *В*	141	282	424	141	70,7	141	282	424	70,7	141
R_1, *Ом*	10	-	10	-	8	14	-	16	14	-
R_2, *Ом*	-	10	5	8	-	2	20	4	6	8
L_1, *мГн*	15,9	31,8	31,8	15,9	-	31,8	19,1	-	31,8	19,1
L_2, *мГн*	15,9	-	63,7	31,8	15,9	-	31,8	15,9	-	31,8
C_1, *мкФ*	-	637	318	-	159	318	637	159	318	637
C_2, *мкФ*	637	318	-	159	318	318	-	318	637	-

Задача 2. В цепь синусоидального тока напряжением U и частотой f включена катушка с активным сопротивлением R и индуктивным X_L рис. 8.22.

Определить: 1) Ток в катушке. 2) Коэффициент мощности. 3) Полную, активную и реактивную мощности. 4) Емкость, при которой в цепи наступит резонанс токов. 5) Построить векторную диаграмму. Данные для своего варианта взять из табл. 8.4.

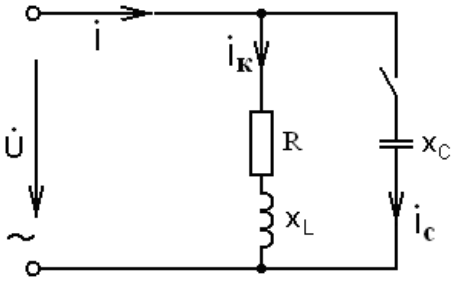


Рис.8.22

Таблица 8.4.

Заданны параметры	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U, В	80	100	120	20	40	60	140	150	160	180
R, Ом	30	40	50	6	8	13,3	6	16	42	36
X_L, *Ом*	40	30	80	4	8,9	8	14,2	22	26,2	57,6

8.3. Трехфазные цепи

Задача 1. Для электрической схемы изображенной на рис. 3.1. по заданным в табл. 8.5. параметрам и линейному напряжению определить: фазные и линейные токи, ток в нейтральном проводе (для четырех проводной схемы), активную, реактивную и полную мощности всей цепи и каждой фазы отдельно. Построить векторную диаграмму токов и напряжений на комплексной плоскости. Расчет проводить комплексным методом.

Указание: ток в нейтральном проводе определить по формуле $\dot{I}_0 = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c$, полученный результат по $\dot{I}_0$ сравнить с результатом по $\dot{I}_0$ полученный из векторной диаграммы по формуле $\dot{I}_0 = l_0 \cdot m_I$.

Задача 2. Для электрической схемы изображенной на рис. 3.3. по заданным в табл. 8.6. параметрам и линейному напряжению определить: фазные и линейные токи, активную, реактивную и полную мощности каждой фазы и всей цепи. Построить векторную диаграмму токов и напряжений на комплексной плоскости. Расчет проводить комплексным методом.

Таблица 8.5

Вариант	*Uл, В*	*Ra, Ом*	*Rв, Ом*	*Rc, Ом*	*Xa, Ом*	*Xв, Ом*	*Xc, Ом*
1	127	4	8	6	4	4	8
2	220	4	8	6	3	4	9
3	380	4	3	6	3	4	8
4	127	5	4	6	6	8	10
5	220	6	5	4	8	10	10
6	380	10	8	6	4	10	10
7	127	10	8	9	8	6	10
8	220	6	4	5	6	8	10
9	380	10	8	8	4	10	10
10	127	5	4	3	4	6	8

Таблица 8.6

Вариант	*Uл, В*	*Rab, Ом*	*Rbc, Ом*	*Rca, Ом*	*Xab, Ом*	*Xbc, Ом*	*Xca, Ом*
1	127	8	4	4	4	4	8
2	220	8	4	4	3	4	9
3	380	8	4	4	3	4	8
4	127	4	8	3	6	8	10
5	220	4	8	3	8	10	10
6	380	4	8	3	4	10	10
7	127	10	8	9	8	6	10
8	220	6	4	5	6	8	10
9	380	10	8	8	4	10	10
10	127	5	4	3	4	6	8

8.4. Трансформаторы

Задача 1. Для однофазного трансформатора, параметры которого приведены в табл. 8.7 определить номинальные токи первичной $I_{1НОМ}$ и вторичной $I_{2НОМ}$ обмоток, коэффициент трансформации, число витков и диаметр каждой обмотки при плотности тока в обмотках $J = 2{,}5$ А/мм^2.

Таблица 8.7

Вариант	$S_{НОМ}$, *кВА*	U_1, *В*	U_2, *В*	B_m, *Тл*	Q_C, *см*^{2}	*f*, *Гц*	η
1	0,05	220	12	1,25	3	50	0,75
2	0,05	127	24	1,45	1,0	400	0,75
3	0,1	380	48	1,2	4,5	50	0,82
4	0,1	64	12	1,5	2,0	400	0,87
5	0,25	220	36	1,1	7,0	50	0,94
6	0,25	64	24	1,4	3,0	400	0,93
7	0,4	220	50	1,2	10	50	0,95
8	0,4	127	36	1,4	5,0	400	0,95
9	0,63	380	50	1,3	11	50	0,96
10	0,63	220	127	1,55	4,5	400	0,06

Задача 2. Для трехфазного трансформатора, параметры которого приведены в табл. 8.8 определить номинальные токи первичной $I_{1НОМ}$ и вторичной $I_{2НОМ}$ обмоток, ток холостого хода I_0, коэффициент мощности

холостого хода $cos\varphi$, коэффициент трансформации n, сопротивления первичной и вторичной обмоток R_1, X_1, R_2, X_2. Построить внешнюю характеристику $U_2 = f_1(\beta)$ и зависимость КПД от нагрузки $\eta = f_2(\beta)$ для $cos\varphi_2 = 0,8$.

Таблица 8.8

№ вар.	Тип тр-ра	Группа соедиинений	Данные для расчета						
			$S_{НОМ}$, *кВА*	$U_{1НОМ}$, *кВ*	U_{20}, *кВ*	$u_К$, %	P_0, *кВт*	$P_К$, *кВт*	I_0, %
1	ТМ-25/6	Y/Y$_0$ - 0	25	6	0,4	4,5	0,135	0,6	3,2
2	ТМ 6300/10	Y/Y$_0$ - 0	6300	10	0,4	6,5	9,0	46,5	0,8
3	ТМ – 40/10	Y/Δ - 11	40	10	0,69	4,5	0,19	0,88	3
4	ТМ 4000/10	Y/Y$_0$ - 0	4000	10	0,4	5,5	6,4	33,5	0,9
5	ТМ – 63/6	Y/Y$_0$ - 0	63	6	0,69	4,5	0,265	1,28	2,8
6	ТМ 2500/10	Y/Δ - 11	2500	10	0,4	5,5	4,6	25	1
7	ТМ – 160/6	Y/Δ - 11	160	6	0,69	4,5	0,565	2,65	2,4
8	ТМ 1600/10	Y/Y$_0$ - 0	1600	10	0,4	5,5	3,3	18	1,3
9	ТМ – 250/6	Y/Y$_0$ - 0	250	6	0,69	4,5	0,82	3,7	2,3
10	ТМ 1000/10	Y/Y$_0$ - 0	1000	10	0,4	5,5	2,45	12,2	1,4
11	ТМ – 100/6	Y/Y$_0$ - 0	100	6	0,69	4,5	0,365	1,97	2,6
12	ТМ 630/10	Y/Y$_0$ - 0	630	10	0,4	5,5	1,56	7,6	2
13	ТМ – 400/6	Y/Y$_0$ - 0	400	6	0,69	4,5	1,05	5,5	2,1
14	ТС3 –160/10	Y/Δ - 11	160	10	0,4	5,5	0,7	2,7	4
15	ТС3 - 250/10	Y/Y$_0$ - 0	250	10	0,4	5,5	1,0	3,8	3,5
16	ТС3 - 400/10	Y/Y$_0$ - 0	400	10	0,4	5,5	1,3	5,4	3
17	ТС3 –630/10	Y/Y$_0$ - 0	630	10	0,4	5,5	2,0	7,3	1,5
18	ТС3 1000/10	Y/Y$_0$ - 0	1000	10	0,4	5,5	3,0	11,2	1,5
19	ТС3 1600/10	Y/Y$_0$ - 0	1600	10	0,4	5,5	4,2	16,0	1,5
20	ТС3 -10/0,66	Y/Δ - 11	10	0,66	0,4	4,5	0,09	0,28	7
21	ТС3 -16/0,38	Y/Δ - 11	16	0,38	0,23	4,5	0,125	0,4	5,8
22	ТС3 25/0,66	Y/Y$_0$ - 0	25	0,66	0,4	4,5	0,180	0,56	4,8
23	ТС3 40/0,38	Y/Y$_0$ - 0	40	0,38	0,23	4,5	0,25	0,8	4
24	ТС3 63/0,66	Y/Y$_0$ - 0	63	0,66	0,4	4,5	0,355	0,109	3,3
25	ТС3 -100/0,38	Y/Y$_0$ - 0	100	0,38	0,23	4,5	0,5	0,15	2,7
26	ТС3 160/0,66	Y/Y$_0$ - 0	160	0,66	0,4	4,5	0,71	0,206	2,3
27	ТМ-25/10	Y/Y$_0$ - 0	25	10	0,69	4,5	0,135	0,6	3,2
28	ТМ – 40/6	Y/Δ - 11	40	6	0,4	4,5	0,19	0,88	3
29	ТМ – 63/10	Y/Y$_0$ - 0	63	10	0,69	4,5	0,265	1,28	2,8
30	ТМ 100/10	Y/Y$_0$ - 0	100	10	0,4	4,5	0,365	1,97	2,6
31	ТМ – 630/6	Y/Y$_0$ - 0	630	6	0,4	5,5	1,56	7,6	2

Окончание табл. 8.8

№ вар.	Тип тр-ра	Группа соедиинений	Данные для расчета						
			$S_{НОМ}$, *кВА*	$U_{1НОМ}$, *кВ*	U_{20}, *кВ*	$u_К$, %	P_0, *кВт*	$P_К$, *кВт*	I_0, %
32	ТМ 400/10	Y/Y_0 - 0	400	10	0,69	4,5	1,05	5,5	2,1
33	ТМ -100/35	Y/Y_0 - 0	100	35	0,4	6,5	0,465	1,97	2,6
34	ТМ -160/35	Y/Y_0 - 0	160	35	0,4	6,5	0,7	2,65	2,4
35	ТМ -250/35	Y/Δ - 11	250	35	0,4	6,5	1,0	3,7	2,3
36	ТМ 400/35	Y/Δ - 11	400	35	0,4	6,5	1,35	5,5	2,1
37	ТМ 630/35	Y/Δ - 11	630	35	0,4	6,5	1,9	7,6	2,0
38	ТМ-25/6	Y/Y_0 - 0	25	6	0,69	4,5	0,135	0,6	3,2
39	ТМ – 40/6	Y/Y_0 - 0	40	6	0,69	4,5	0,19	0,88	3
40	ТМ – 63/10	Y/Y_0 - 0	63	10	0,4	4,5	0,265	1,28	2,8
41	ТМ 100/10	Y/Y_0 - 0	100	10	0,69	4,5	0,365	1,97	2,6
42	ТМ 250/10	Y/Y_0 - 0	250	10	0,69	4,5	0,82	3,7	2,3
43	ТМ – 630/6	Y/Y_0 - 0	630	6	0,69	5,5	1,56	7,6	2
44	ТМ 400/10	Y/Y_0 - 0	400	10	0,4	4,5	1,05	5,5	2,1
45	ТМ – 400/6	Y/Y_0 - 0	400	6	0,4	4,5	1,05	5,5	2,1
46	ТМ 630/10	Y/Y_0 - 0	630	10	0,69	5,5	1,56	7,6	2
47	ТС3 -16/0,66	Y/Y_0 - 0	16	0,66	0,4	4,5	0,125	0,4	5,8
48	ТС3 40/0,66	Y/Y_0 - 0	40	0,66	0,4	4,5	0,25	0,8	4
49	ТС3 -100/0,66	Y/Y_0 - 0	100	0,66	0,4	4,5	0,5	0,15	2,7
50	ТС3 25/0,38	Y/Y_0 - 0	25	0,38	0,23	4,5	0,180	0,56	4,8

8.5. Асинхронные двигатели

Задача 1. Номинальная мощность трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором $P_{НОМ}$, номинальное напряжение $U_{НОМ}$, номинальная частота вращения ротора $n_{НОМ}$, номинальный КПД $\eta_{НОМ}$ номинальный коэффициент мощности $cos\varphi$, число пар полюсов обмотки статора p, кратность пускового тока $\beta = I_{ПУСК} / I_{НОМ}$; кратность пускового момента $\delta = M_{ПУСК} / M_{НОМ}$; кратность максимального момента $\lambda = M_{MAX} / M_{НОМ}$. Определить: мощность, потребляемую из сети $P_{1НОМ}$, номинальный $I_{НОМ}$ и пусковой $I_{ПУСК}$ токи, частоту вращения магнитного поля статора n_1, номинальное $s_{НОМ}$ и критическое $s_{КР}$ скольжение, номинальный, максимальный и пусковой моменты двигателя. Построить механическую характеристику $M = f(n)$. Данные взять из табл. 8.9.

Таблица 8.9

№ вар.	$P_{НОМ}$, *кВт*	$U_{НОМ}$, *В*	$n_{НОМ}$, *об/мин*	$\eta_{НОМ}$, *%*	*cosφ*	*p*	$\frac{I_{ПУСК}}{I_{НОМ}}$	$\frac{M_{ПУСК}}{M_{НОМ}}$	$\frac{M_{МАХ}}{M_{НОМ}}$
1	0,25	220	860	56	0,72	3	3.0	2,2	2,0
2	0,37	380	1375	66	0,76	2	3,7	2,0	2,0
3	0,55	660	2850	74	0,84	1	6,5	2,3	2,4
4	0,75	220	935	70	0,72	3	4,0	2,2	2,5
5	1,1	380	1420	77	0,8	2	5,5	2,3	2,6
6	1,5	660	2835	79	0,87	1	6,5	2,8	3,0
7	2,2	220	960	78	0,74	3	5,5	1,9	2,5
8	3,0	380	1420	81	0,81	2	6,2	2,2	2,6
9	4,0	660	2895	84	0,87	1	6,8	2,2	3,3
10	5,5	220	950	82	0,82	3	6,0	2,2	2,5
11	7,5	380	1455	83	0,83	2	7,0	2,8	3,2
12	11,0	660	2940	87,5	0,89	1	6,8	2,0	3,3
13	15	380	970	89	0,82	3	7,0	2,3	3,0
14	18,5	660	1460	90,5	0,89	2	7,0	1,9	2,
15	22	380	2940	90,5	0,89	1	7,5	2,1	35
16	30	660	1475	91	0,86	2	7,7	2,7	3,2
17	37	380	2950	92	0,89	1	7,5	2,4	3,0
18	45	380	740	91	0,84	4	6,0	1,2	2,0
19	55	660	985	91,5	0,8	3	6,5	1,2	2,0
20	75	380	1480	93	0,9	2	7,0	1,2	2,3
21	90	660	2960	92	0,9	1	7,5	1,2	2,2
22	110	380	590	93	0,83	5	6,0	1,0	1.8
23	132	660	740	93,5	0,85	4	6,5	1,2	2,2
24	160	380	1480	93,5	0,91	2	6,0	1,3	2,2
25	200	660	1480	94,0	0,92	2	6,0	1,3	2,2

Таблица 8.10

№ вар.	$P_{НМ}$, *кВт*	$U_{НОМ}$, *В*	*Соед. обм. стат.*	$U_{СЕТИ}$, *В*	$n_{НОМ}$, *об/мин*	$\eta_{НОМ}$, *%*	*cosφ*	$\frac{I_{ПУСК}}{I_{НОМ}}$	$\frac{M_{ПУСК}}{M_{НОМ}}$	$\frac{M_{МАХ}}{M_{НОМ}}$
26	0,25	220/127	Y/Δ	127	860	56	0,72	3.0	2,2	2,0
27	0,37	380/220	Y/Δ	220	1375	66	0,76	3,7	2,0	2,0
28	0,55	660/380	Y/Δ	660	2850	74	0,84	6,5	2,3	2,4
29	0,75	220/127	Y/Δ	220	935	70	0,72	4,0	2,2	2,5
30	1,1	380/220	Y/Δ	220	1420	77	0,8	5,5	2,3	2,6
31	1,5	660/380	Y/Δ	660	2835	79	0,87	6,5	2,8	3,0

Окончание табл.8.10

№ вар.	$P_{НМ}$, *кВт*	$U_{НОМ}$, *В*	*Соед. обм. стат.*	$U_{СЕТИ}$, *В*	$n_{НОМ}$, *об/мин*	$\eta_{НОМ}$, *%*	*cosφ*	$\frac{I_{ПУСК}}{I_{НОМ}}$	$\frac{M_{ПУСК}}{M_{НОМ}}$	$\frac{M_{МАХ}}{M_{НОМ}}$
32	2,2	220/127	Y/Δ	220	960	78	0,74	5,5	1,9	2,5
33	3,0	380/220	Y/Δ	380	1420	81	0,81	6,2	2,2	2,6
34	4,0	660/380	Y/Δ	380	2895	84	0,87	6,8	2,2	3,3
35	5,5	220/127	Y/Δ	127	950	82	0,82	6,0	2,2	2,5
36	7,5	380/220	Y/Δ	380	1455	83	0,83	7,0	2,8	3,2
37	11,0	660/380	Y/Δ	380	2940	87,5	0,89	6,8	2,0	3,3
38	15	380/220	Y/Δ	220	970	89	0,82	7,0	2,3	3,0
39	18,5	660/380	Y/Δ	660	1460	90,5	0,89	7,0	1,9	2,9
40	22	380/220	Y/Δ	380	2940	90,5	0,89	7,5	2,1	3,5
41	30	660/380	Y/Δ	380	1475	91	0,86	7,7	2,7	3,2
42	45	380/220	Y/Δ	380	2945	91	0,9	7,5	1,4	2,2
43	55	380/220	Y/Δ	380	1480	92,5	0,9	7,0	1,3	2,5
44	75	380/220	Y/Δ	380	985	92	0,89	5,5	1,4	2,2
45	90	660/380	Y/Δ	660	740	93	0,85	6,5	1,2	2,3
46	110	660/380	Y/Δ	660	2970	91	0,89	7,0	1,2	2,2
47	15	660/380	Y/Δ	380	2940	88	0,91	7,5	1,4	2,2
48	5,5	380/220	Y/Δ	220	720	83	0,74	5,5	1,9	2,6
49	22	380/220	Y/Δ	380	1470	90	0.9	6,5	1,4	2,3
50	4,0	660/380	Y/Δ	380	720	83	0,7	5,5	1,9	2,6

8.6. Машины постоянного тока

Задача. Двигатель параллельного возбуждения, с номинальным напряжением $U_Н$, развивает номинальную мощность $P_Н$. Номинальная скорость вращения якоря $h_Н$ и минимальный К.П.Д. $\eta_Н$. Потери мощности в цепи якоря $\Delta P_Я$ и в цепи возбуждения $\Delta P_В$ заданы в процентах от потребляемой мощности двигателя $P_Н$ (табл. 8.11). Определить: ток в цепи возбуждения, ток и сопротивление якоря при номинальной нагрузке $I_{Я.Н.}$, номинальный вращающий момент при пуске двигателя с пусковым реостатом, построить механическую характеристику двигателя (М), определить $\Delta P_{МЕХ} + \Delta P_{МАГН}$.

Таблица 8.11

Вариант	Данные для расчета					
	$U_н$,В	$P_н$, *кВт*	$\Delta P_я$,%	$\Delta P_в$,%	$n_н$,*об/мин*	$\eta_н$,%
1	110	60	5,2	4,8	980	86,5
2	220	10	5	4,8	2250	86
3	220	4	6,2	4,2	1025	82,2
4	220	6,6	6,2	4,1	2400	85,5
5	220	4,4	6,5	4,8	2100	84,5
6	220	2,5	5,8	4,8	1000	85
7	220	10	5,3	4,4	2250	83
8	110	77	5,0	4,2	1050	85,5
9	110	80	5,4	4,5	1150	85,8
10	110	92	5,3	4,1	970	86,5
11	110	66	6,2	5,0	1050	85,5
12	110	35	6,3	5,2	2200	84,5
13	110	45	5,7	4,6	1500	85,0
14	220	15	5,0	4,0	1000	84,4
15	220	10	5,2	4,2	970	85,5
16	220	5,8	6,0	5,0	2200	84
17	220	19	4,8	4,5	980	86,5
18	220	29	5,0	4,3	2520	86
19	220	46,5	5,4	4,8	1025	82,2
20	220	14	4	4,6	2400	84
21	220	20,5	5,1	4,2	2100	85,5
22	220	33,5	5,5	4,0	1000	84,5
23	220	8,5	4	4,1	2250	85,5
24	220	13,5	4,8	4,2	1050	85
25	110	60	5,0	4,0	1150	84,5

8.7. Выпрямители

Задача. По заданным параметрам нагрузки, табл. 8.12, рассчитать недостающие параметры нагрузки. Выбрать схему выпрямления и начертить ее с питанием от трансформатора. Сглаживающий фильтр не применять. Рассчитать параметры выпрямителя и вентилей (диодов). По справочнику выбрать тип вентилей (диодов).

Принятые обозначения: P_0 – мощность постоянного тока нагрузки; U_0 – напряжение постоянного тока на нагрузке; I_0 – постоянный ток нагрузки; $R_{нагр.}$ – сопротивление нагрузки; $I_а$ – расчетный ток вентиля; $U_{обр.макс}$ – допустимое обратное напряжение на вентиле (диоде);

U_2 – фазное напряжение вторичной обмотки питающего трансформатора; U_1 – фазное напряжение первичной обмотки питающего трансформатора; I_2 – фазный ток вторичной обмотки трансформатора; I_1 – фазный ток первичной обмотки трансформатора; $P_{тр}$ – средняя (типовая) мощность питающего трансформатора.

Таблица 8.12

вариант	Параметры нагрузки			
	P_0, кВт	U_0, В	I_0, А	$R_{нагр.}$, Ом
1	0,1	9		
2	3,0		150	
3	0,4			3,24
4		100	70	
5		220		48,35
6			45,45	9,68
7	1,5	64		
8	3,0		68,2	
9	0,05			4,5
10		110	90,9	

8.8. Задания по аналоговой электронике

Таблица 8.13

вариант	Тема задания
1	Схема, принцип действия усилителя низкой частоты (УНЧ) с эмиттерной температурной стабилизацией.
2	Графический анализ работы усилителя низкой частоты
3	Двухкаскадный усилитель низкой частоты с резистивно-емкостной связью. Схема, принцип действия, достоинства и недостатки.
4	Усилитель постоянного тока (УПТ
5	Операционные усилители.
6	Усилители мощности с выходным трансформатором.
7	Усилители мощности без выходных трансформаторов.
8	Характеристики усилителей низкой частоты: амплитудная; амплитудно-частотная (АЧХ); фазочастотная (ФЧХ).
9	Обратные связи в усилителях.
10	Линейные и нелинейные искажения сигнала в усилителях.

8.9. Задания по импульсной и цифровой электронике

Таблица 8.14

вариант	Тема задания
1	Импульсные сигналы: виды сигналов; параметры сигналов; параметры серии сигналов; способы получения.
2	Мультивибраторы.
3	Генераторы линейно изменяющегося напряжения.
4	LC – автогенераторы гармонических колебаний.
5	RC – автогенераторы гармонических колебаний с мостом Вина.
6	RC – автогенераторы гармонических колебаний с RC фазосдвигающей цепью.
7	Логические элементы
8	Триггеры на логических элементах
9	Цифровые счетчики импульсов
10	Микропроцессоры. Структура. Принцип действия

8.10. Задание по логическим элементам

В схеме, приведенной на рис.8.23 определить сигналы на выходах F_1, F_2, F_3. Значение на входах x_1, x_2, x_3, x_4 даны в табл. 8.15.

Таблица 8.15

Вариант	x_1	x_2	x_3	x_4	Вариант	x_1	x_2	x_3	x_4
1	0	1	0	0	6	1	1	1	0
2	1	0	1	1	7	1	1	0	1
3	0	1	0	0	8	1	0	1	1
4	0	1	0	0	9	0	0	1	0
5	0	0	0	0	10	1	1	1	1

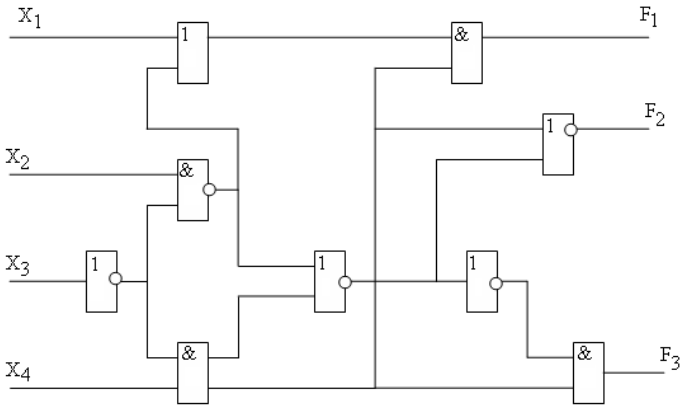


Рис.8.23. Схема включения логических элементов.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Схемы выпрямления и формы выходного напряжения при активной нагрузке

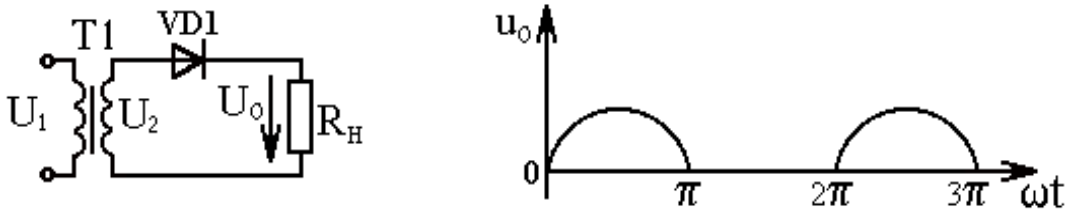


Рис. 1П. Однофазная однополупериодная

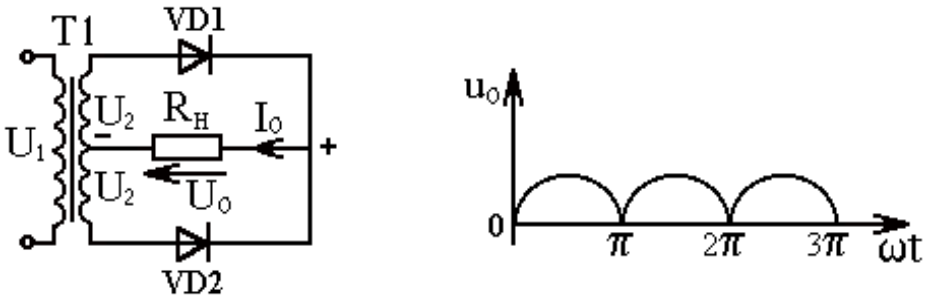


Рис. 2П. Однофазная с выводом средней точки

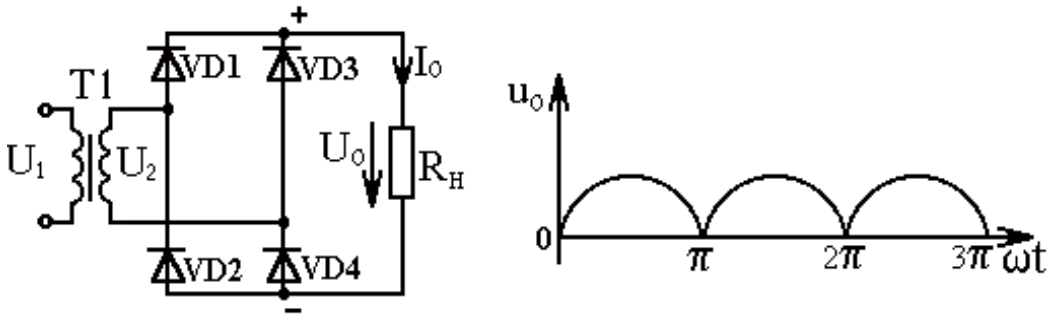


Рис. 3П. Однофазная мостовая

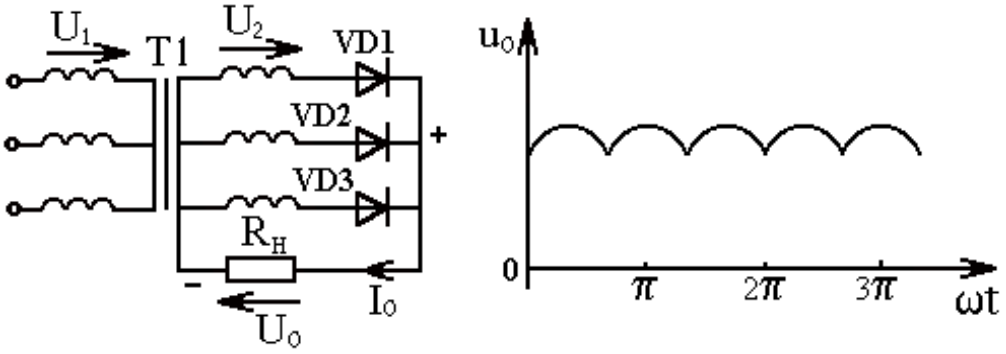


Рис. 4П. Трехфазная с выводом нейтрали

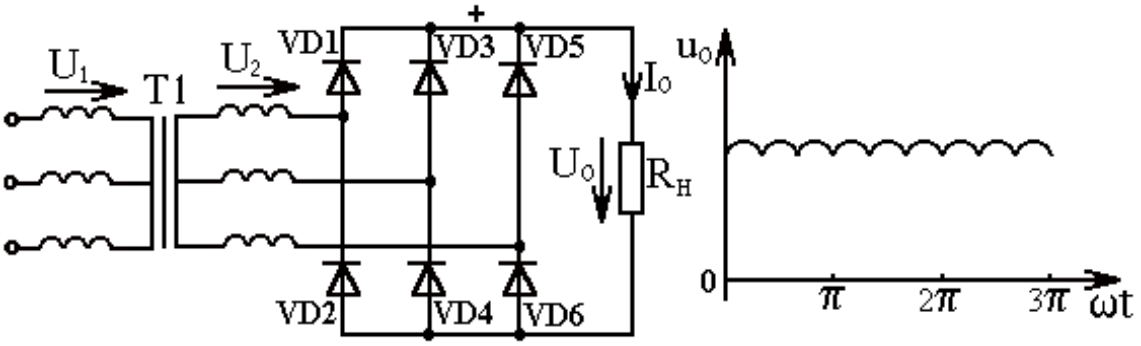


Рис. 5П. Трехфазная мостовая

Соотношения между токами и напряжениями в выпрямителях

Схема выпрямления	$\frac{U_0}{U_{2Ф}}$	$\frac{U_{ОБР.МАКС.}}{U_0}$	$\frac{I_a}{I_0}$	$\frac{I_{а\,макс}}{I_0}$	$\frac{I_2}{I_0}$	$\frac{S_{ТР}}{P_0}$	Коэфф. пульсации, % ($q_{ВХ}$)
Однополупериодная	0,45	3,14	1	3,14	1,57	3,09	157
Однофазная нулевая	0,9	3,14	0,5	1,57	0,785	1,48	67
Однофазная мостовая	0,9	1,57	0,5	1,57	1,11	1,23	67
Трехфазная нулевая	1,17	2,09	0,33	1,21	0,585	1,35	25
Трехфазная мостовая	2,34	1,05	0,33	1,05	0,817	1,05	6

U_0, I_0, P_0 - средние значения выпрямленного напряжения, тока, и мощности на нагрузке.

$U_{ОБР.МАКС.}$ - допустимое длительное обратное напряжение, выдерживаемое вентилем (оно в 2 раза меньше $U_{ПРОБОЯ}$).

I_a - средний прямой ток вентиля. Его паспортное значение (номинальное значение).

$U_{2Ф}$ - фазное напряжение на вторичной обмотке трансформатора.

$I_{а\,макс}$ - амплитудное значение тока через вентиль.

Приложение 2

Диоды низкочастотные

Тип прибора	Iпр макс, А	Uобр макс, В	Uпр макс, В	Iобр макс, мА	f, кГц	T, ˚C
Д112 - 10	10	100 - 1400	1,35	1,0	1,35	- 50 ... +190
Д112 - 16	16	100 - 1400	1,35	1,0	1,35	- 50 ... +190
Д112 - 25	25	100 - 1400	1,35	1,0	1,35	- 50 ... +190
Д112 - 32	32	100 - 1400	1,35	6,0	1,35	- 50 ... +190
Д112 - 40	40	100 - 1400	1,35	6,0	1,35	- 50 ... +190
Д112 - 50	50	100 - 1400	1,35	8,0	1,35	- 50 ... +190
Д112 - 80	80	100 - 1400	1,35	8,0	1,35	- 50 ... +190
Д112 - 100	100	300 - 1600	1,45	20	0,5	- 60 ... +190