

Г.М. ТРЕТЬЯК, Ю.Б. ТИХОНОВ

**ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
И ЭЛЕКТРОНИКА**

Учебное пособие

Омск • 2006

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
СИБИРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНАЯ
АКАДЕМИЯ (СИБАДИ)

Г.М.Третьяк, Ю.Б.Тихонов

ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
И ЭЛЕКТРОНИКА

Учебное пособие

Омск
Издательство СибАДИ
2006

Учебное издание

Третьяк Галина Михайловна, Тихонов Юрий Борисович

ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Учебное пособие

Главный редактор М.А.Тихонова

* * *

Подписано к печати 13.10.06.
Бумага писчая. Формат $60 \times 90^{1/16}$
Оперативный способ печати
Гарнитура Times New Roman Cyr
Усл.п.л. 13,5, уч.-изд. л. 13,5
Тираж 400 экз. Заказ
Цена договорная

* * *

Издательство СибАДИ
644099, г. Омск-99, ул. П. Некрасова, 10

Отпечатано в ПЦ издательства СибАДИ
644099, г. Омск-99, ул. П. Некрасова, 10

УДК 621.311
ББК 31.211
Т 66

Рецензенты:

канд. техн. наук, профессор кафедры «А и СУ» ОмГУПС В.Г. Шахов;
канд. техн. наук, зав. кафедрой «Электротехника
и электрооборудование» ОФ НГАВТ А.А. Руппель

Работа одобрена редакционно-издательским советом СибАДИ в качестве учебного пособия по электротехнике для студентов 1–3 курсов неэлектротехнических специальностей.

Третьяк Г.М., Тихонов Ю.Б.

ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА: Учебное пособие. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2006. – 215 с.

ISBN 5–93204–251–6

В учебном пособии рассмотрены основные теоретические сведения о линейных электрических цепях постоянного и переменного тока, асинхронных машинах, машинах постоянного тока, трансформаторах, полупроводниковых приборах, приведены примеры расчета, содержатся контрольные вопросы и исходные данные для выполнения расчетно-графических и курсовых работ.

Учебный материал пособия изложен кратко и может служить дополнением к учебному материалу, изложенному в учебниках.

Настоящее учебное пособие предназначено для изучения дисциплины «Общая электротехника и электроника» студентами неэлектротехнических специальностей.

Табл. 5. Ил. 136. Библиогр.: 5 назв.

ISBN 5–93204–251–6

© Г.М.Третьяк, Ю.Б.Тихонов, 2006
© Издательство СибАДИ, 2006

Оглавление

Введение.....	7
1. Электрические цепи постоянного тока.....	8
1.1. Электрическая цепь, ее элементы и параметры.....	8
1.2. Способы соединения резисторов в электрических цепях.....	10
1.2.1. Последовательное соединение резисторов.....	10
1.2.2. Параллельное соединение резисторов.....	10
1.3. Режимы работы источников питания.....	11
1.4. Баланс мощностей электрической цепи.....	11
1.5. Потенциалы точек электрической цепи. Потенциальная диаграмма.....	12
1.6. Анализ электрических цепей с одним источником питания....	14
1.7. Анализ сложных электрических цепей с несколькими источниками питания.....	17
1.8. Пример расчета сложной электрической цепи.....	21
Контрольные вопросы по электрическим цепям постоянного тока.....	22
Задание на самостоятельную работу по электрическим цепям постоянного тока.....	26
2. Однофазные электрические цепи переменного тока.....	37
2.1. Основные понятия о переменном токе.....	37
2.2. Элементы и параметры электрических цепей переменного тока.....	38
2.2.1. Цепь переменного тока с активным сопротивлением.....	38
2.2.2. Цепь переменного тока с индуктивным элементом.....	39
2.2.3. Цепь переменного тока с емкостным элементом.....	41
2.3. Анализ неразветвленной цепи переменного тока.....	43
2.4. Резонанс напряжений.....	45
2.5. Пример расчета неразветвленной цепи переменного тока.....	46
2.6. Анализ разветвленной цепи переменного тока методом проводимостей.....	48
2.7. Резонанс токов.....	51
2.8. Пример расчета разветвленной цепи переменного тока.....	53
 2.9. Пример расчета цепи переменного тока со смешанным соединением нагрузки.....	 55

Контрольные вопросы по однофазным электрическим	58
цепям переменного тока.....	
3. Трехфазные электрические цепи переменного тока.....	63
3.1. Основные понятия трехфазной цепи.....	63
3.2. Получение трехфазной системы ЭДС.....	63
3.3. Схема соединения «звездой» в трехфазных цепях.....	66
3.4. Схема соединения «треугольником» в трехфазных цепях.....	70
3.5. Мощность в трехфазных цепях.....	73
3.5.1. Мощность трехфазной цепи при любом	73
характере нагрузки.....	
3.5.2. Измерение активной мощности в трехфазных цепях.....	74
3.5.3. Коэффициент мощности и его технико-экономическое значение. Компенсация реактивной мощности.....	75
3.6. Пример расчета трехфазной	80
цепи.....	

Контрольные вопросы по трехфазным электрическим	82
цепям переменного тока.....	
Задание на самостоятельную работу по цепям переменного тока «Расчет трехфазной электрической цепи при соединении нагрузки «звездой».....	87
Задание на самостоятельную работу по цепям переменного тока «Расчет трехфазной электрической цепи при соединении нагрузки «треугольником».....	100
4. Асинхронные двигатели.....	114
4.1. Основные понятия.....	114
4.2. Устройство трехфазного асинхронного двигателя.....	114
4.3. Вращающееся магнитное поле статора асинхронного двигателя.....	117
4.4. Принцип действия асинхронного двигателя.....	118
4.5. Механические характеристики асинхронного двигателя.....	120
4.6. Свойство саморегулирования вращающего момента асинхронного двигателя.....	124
4.7. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей.....	125
4.8. Коэффициент полезного действия	

асинхронного двигателя.....	128
4.9. Коэффициент мощности асинхронного двигателя.....	129
4.10. Генераторные и тормозные режимы работы асинхронного двигателя.....	130
4.10.1. Генераторный режим с отдачей энергии в сеть.....	130
4.10.2. Режим торможения	131
противовключением.....	
 4.11. Пример расчета режима работы	 132
трехфазного асинхронного двигателя.....	
Контрольные вопросы по асинхронным двигателям.....	134
Задание на самостоятельную работу по асинхронным двигателям.....	138
5. Машины постоянного тока.....	140
5.1. Устройство машин постоянного тока.....	140
5.2. Принцип действия машин постоянного тока в различных режимах работы.....	142
5.2.1. Режим двигателя.....	142
5.2.2. Режим генератора.....	143
5.3. Реакция якоря.....	143
5.4. Классификация машин постоянного тока по способу возбуждения.....	144
5.5. Характеристики двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением.....	144
5.6. Регулирование частоты вращения двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением.....	147
5.7. Характеристики двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением.....	148
5.8. Регулирование частоты вращения двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением.....	151
5.9. Характеристики двигателя постоянного тока со смешанным возбуждением.....	153
5.10. Генераторные и тормозные режимы работы двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением.....	154
5.11. Коэффициент полезного действия двигателя и потери мощности.....	158

5.12. Примеры расчета режимов работы двигателей	159
постоянного тока и построения механической характеристики.....	
Контрольные вопросы по машинам постоянного тока.....	163
Задание на самостоятельную работу	
по машинам постоянного тока.....	167
6. Трансформаторы	169
6.1. Принцип действия трансформатора.....	169
6.2. Работа трансформатора в режиме холостого хода.....	170
6.3. Работа трансформатора с нагрузкой.....	171
6.4. Трехфазные трансформаторы.....	172
6.5. Коэффициент полезного действия трансформатора.....	172
Контрольные вопросы по трансформаторам.....	173
7. Электроника	177
7.1. Полупроводниковые диоды.....	177
7.2. Выпрямители переменного тока.....	180
7.2.1. Основные понятия.....	180
7.2.2. Однополупериодный выпрямитель.....	181
7.2.3. Двухполупериодный выпрямитель.....	182
7.2.4. Сглаживающие фильтры.....	184
7.3. Тиристоры.....	185
7.4. Управляемые выпрямители.....	188
7.5. Регулятор переменного тока.....	189
7.6. Биполярные транзисторы.....	191
7.7. Нагрузочный режим работы биполярного транзистора.....	194
7.8. Полевые транзисторы.....	196
Контрольные вопросы по электронике.....	198
8. Вопросы итогового контроля	207
8.1 Цепи постоянного тока.....	207
8.2. Однофазные цепи переменного тока.....	208
8.3. Трехфазные цепи переменного тока.....	209
8.4. Асинхронные двигатели.....	210
8.5. Машины постоянного тока.....	212
8.6. Трансформаторы.....	212
8.7. Электроника.....	213
Библиографический список.....	214

ВВЕДЕНИЕ

Электротехника как наука является областью знаний, в которой рассматриваются электрические и магнитные явления и их практическое использование. На базе электротехники начали развиваться электроника, радиотехника, электропривод и другие смежные науки.

Электрическая энергия применяется во всех областях человеческой деятельности. Производственные установки на предприятиях имеют в основном электрический привод, т.е. приводятся в действие электрическими двигателями. Для измерения электрических и неэлектрических величин широко применяются электрические приборы и устройства.

Непрерывно расширяющееся применение различных электротехнических и электронных устройств обуславливает необходимость знания специалистами всех областей науки, техники и производства основных понятий об электрических и электромагнитных явлениях и их практическом использовании.

Знание студентами данной дисциплины обеспечит их плодотворную деятельность в будущем как инженеров при современном состоянии энерговооруженности предприятий.

В результате полученных знаний инженер неэлектротехнических специальностей должен уметь квалифицированно эксплуатировать электротехническое и электронное оборудование и электропривод, применяемые в условиях современного производства, знать пути и методы экономии электроэнергии.

Данное пособие предназначено для самостоятельной внеаудиторной работы.

1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1.1. Электрическая цепь, ее элементы и параметры

Основные электротехнические устройства по своему назначению подразделяются на устройства, генерирующие электрическую энергию, и устройства, использующие электрическую энергию.

В источнике электрической энергии механическая, тепловая, химическая или атомная энергия преобразуется в электрическую энергию. Потребители преобразуют электрическую энергию в другие виды энергии.

Электрической цепью называется совокупность устройств, предназначенных для генерирования, передачи, преобразования и использования электрической энергии. Процессы в них могут быть описаны с помощью понятий об электрическом токе, электрическом напряжении и электродвижущей силе (ЭДС).

Отдельные устройства, входящие в электрическую цепь, называются *элементами* электрической цепи.

Часть электрической цепи, содержащая выделенные в ней элементы, называется *участком* цепи.

Элементы цепи, предназначенные для генерирования электрической энергии, называются *источниками питания*, а элементы, использующие электрическую энергию, называются *приемниками* электрической энергии.

Элементы электрической цепи, связывающие между собой источники и приемники энергии, называются *звеном*.

Кроме электрических проводов в звено могут входить приборы контроля и управления, а также преобразующие устройства (трансформаторы, выпрямители и т.п.).

Узел – это точка электрической цепи, в которой сходятся *три или больше* проводов.

Ветвь – это часть электрической цепи между двумя *соседними* узлами. Между двумя соседними узлами может быть несколько ветвей. Они оказываются включенными *параллельно* друг другу.

Графическое изображение электрической цепи, содержащее условные обозначения ее элементов, называется *электрической схемой* цепи.

Все основные и вспомогательные элементы в схемах электрических цепей имеют условные графические обозначения (рис. 1).

Направление тока в замкнутой электрической цепи принято от положительного полюса источника питания к отрицательному.

На всех участках неразветвленной электрической цепи протекает один и тот же ток. Для замкнутой неразветвленной электрической цепи (см. рис. 1) величина тока определяется по закону Ома

$$I = \frac{E}{R_1 + R_2 + r_0}, \quad (1)$$

где E – ЭДС источника питания; R_1 и R_2 – сопротивления резисторов; r_0 – внутреннее сопротивление источника питания.

В электрической цепи различают два участка: внутренний и внешний. Источник является внутренним участком. Все остальные элементы относятся к внешнему участку.

Источник электрической энергии осуществляет направленное перемещение электрических зарядов по всей замкнутой цепи. Интенсивность направленного перемещения зарядов характеризует величину тока I .

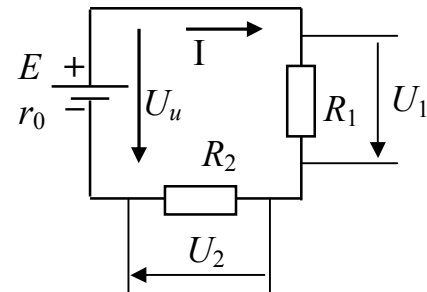


Рис. 1. Схема электрической цепи

Из уравнения (1) определим ЭДС.

$$E = I \cdot (R_1 + R_2 + r_0) = I \cdot R_1 + I \cdot R_2 + I \cdot r_0. \quad (2)$$

Таким образом, при протекании тока в цепи на каждом элементе возникают падения напряжения:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= I \cdot R_1; \\ U_2 &= I \cdot R_2; \\ U_0 &= I \cdot r_0, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где U_1 и U_2 – падения напряжения на внешнем участке цепи; U_0 – падение напряжения на внутреннем участке цепи.

С учетом соотношений (3) уравнение (2) примет вид

$$E = U_1 + U_2 + U_0 = U_u + U_0, \quad (4)$$

где $U_u = U_1 + U_2$ – напряжение на выходе источника питания.

Из уравнения (4)

$$U_u = E - U_0, \quad (5)$$

или

$$U_u = E - I \cdot r_0. \quad (6)$$

Из уравнения (6) видно, что напряжение на выходе источника питания меньше ЭДС на величину падения напряжения на внутреннем сопротивлении источника.

С увеличением нагрузки во внешней цепи (например, уменьшением сопротивления R_1) увеличивается ток (см.

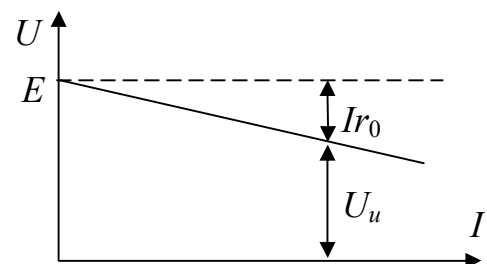


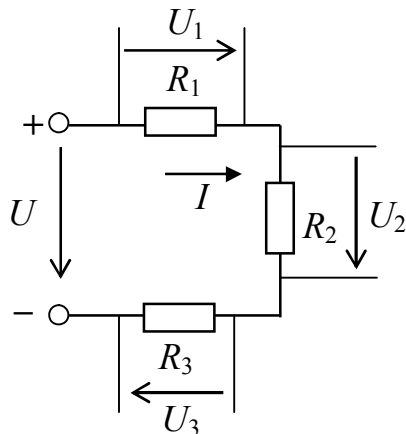
Рис. 2. Внешняя характеристика источника питания

пряжения на внутреннем сопротивлении источника r_0 , что приводит к уменьшению напряжения на выходе источника питания.

Зависимость выходного напряжения источника питания от тока нагрузки называется внешней характеристикой источника питания (рис. 2).

1.2. Способы соединения резисторов в электрических цепях

1.2.1. Последовательное соединение резисторов



Последовательное соединение резисторов – это такое соединение, при котором через все участки цепи протекает один и тот же ток (рис. 3).

Полное сопротивление цепи

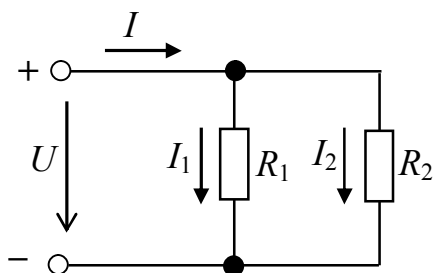
$$R = R_1 + R_2 + R_3; \quad (7)$$

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2 + R_3}; \quad (8)$$

$$U = U_1 + U_2 + U_3. \quad (9)$$

Рис. 3. Последовательное соединение резисторов

1.2.2. Параллельное соединение резисторов



Параллельное соединение резисторов – это такое соединение, при котором все участки цепи подключены к одной паре узлов, т.е. находятся под одним напряжением (рис. 4).

Для данной схемы

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U}{R_2}; \quad I = I_1 + I_2. \quad (10)$$

Используя уравнения (10), выведем соотношения для определения полного сопротивления всей цепи:

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}. \quad (11)$$

Разделим обе части уравнения (11) на величину U :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}. \quad (12)$$

Из уравнения (12)

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}. \quad (13)$$

1.3. Режимы работы источников питания

Рассмотрим неразветвленную цепь с четырьмя источниками питания (рис. 5). Источники ЭДС E_1 , E_2 , E_4 включены согласно друг с другом. Источник ЭДС E_3 по отношению к ним включен встречно. Направление тока в такой цепи определяется направлением суммарной большей ЭДС, действующей в данном контуре.

Допустим, что $E_3 < E_1 + E_2 + E_4$, тогда ток в данной цепи будет направлен против часовой стрелки.

Источник, ЭДС которого имеет одинаковое направление с током (в данном случае E_1 , E_2 , E_4), работает в режиме генератора. Напряжение такого источника меньше ЭДС этого источника на величину падения напряжения на внутреннем сопротивлении источника.

$$U = E - I \cdot r_0. \quad (14)$$

Источник, направление ЭДС которого противоположно току (в данном случае E_3), уменьшает ток в цепи и работает в режиме нагрузки, т.е. является потребителем электрической энергии. Напряжение такого источника

$$U = E + I \cdot r_0. \quad (15)$$

Таким образом, у источников в режиме генератора напряжение меньше ЭДС, а в режиме потребителя – больше ЭДС на величину падения напряжения на внутреннем сопротивлении источника.

1.4. Баланс мощностей электрической цепи

Любой источник питания имеет определенный запас энергии, которая расходуется в приемниках электрической энергии. В элементах электрической цепи происходит преобразование одного вида энергии в другой. Скорость такого преобразования энергии определяет электрическую мощность P .

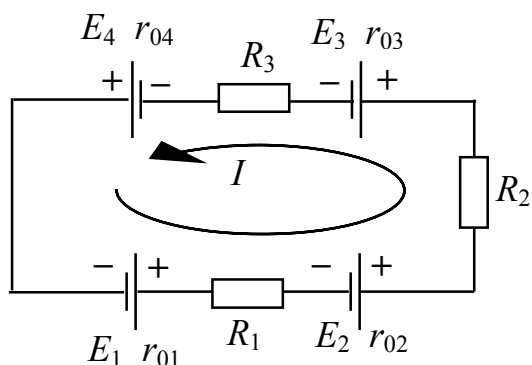


Рис. 5. Схема неразветвленной цепи с четырьмя источниками питания

$$P = \frac{A}{t} = \frac{I \cdot U \cdot t}{t} = I \cdot U, \quad (16)$$

где A – работа, или электрическая энергия в джоулях [Дж]; P – мощность в ваттах [Вт]; t – время в секундах [с].

Практической единицей измерения электрической энергии является киловатт-час [кВт·ч], т.е. работа, совершаемая при неизменной мощности 1 кВт в течение одного часа.

Для источника ЭДС, направление которой совпадает с направлением тока, мощность считается положительной.

$$P = E \cdot I. \quad (17)$$

Если направления ЭДС и тока противоположны, то

$$P = -E \cdot I. \quad (18)$$

Для приемников электрической энергии, в частности для резисторов, мощность можно определить через величину сопротивления, заменив по закону Ома $U = I \cdot R$:

$$P = U \cdot I = I^2 \cdot R, \quad (19)$$

где U – падение напряжения на сопротивлении R .

В любой электрической цепи должен соблюдаться энергетический баланс – баланс мощностей, т.е. алгебраическая сумма мощностей всех источников энергии должна быть равна алгебраической сумме мощностей всех приемников электрической энергии $\sum P_u = \sum P_n$.

В качестве примера составим баланс мощностей для цепи на рис. 5:

$$\begin{aligned} E_1 \cdot I + E_2 \cdot I - E_3 \cdot I + E_4 \cdot I = \\ = I^2 \cdot R_1 + I^2 \cdot R_2 + I^2 \cdot R_3 + I^2 \cdot r_{01} + I^2 \cdot r_{02} + I^2 \cdot r_{03} + I^2 \cdot r_{04}. \end{aligned} \quad (20)$$

1.5. Потенциалы точек электрической цепи.

Потенциальная диаграмма

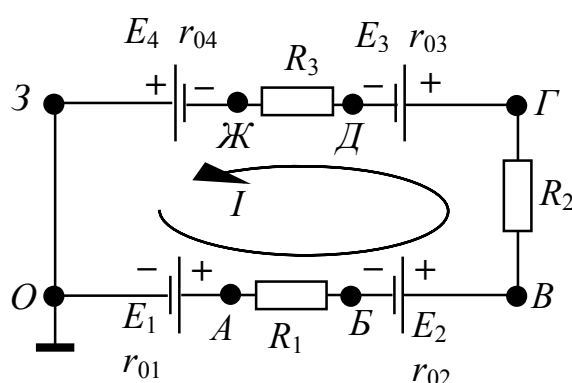


Рис. 6. Схема для расчета потенциалов отдельных точек цепи

В любом замкнутом контуре можно рассчитать потенциалы точек электрической цепи и по их значениям определить напряжение на любом участке цепи. Определим потенциалы точек, обозначенных в рассматриваемой схеме (рис. 6).

В этой схеме, как было сказано выше, источники ЭДС $E_1 + E_2 + E_4$ работают в режиме генератора, а источник ЭДС E_3 работает в режиме нагрузки, ток направлен против часовой

Для расчета потенциалов точек замкнутого контура электрической цепи выбирается исходная точка, от которой начинается расчет. Потенциал этой точки принимается равным нулю (условно ее соединяют с массой). В данной схеме за исходную взята точка O (см. рис. 6).

Таким образом, $\varphi_O = 0$. Относительно этой точки в направлении протекания тока рассчитываются потенциалы всех точек контура.

Если на участке между двумя точками включен источник питания, работающий в режиме генератора, то потенциал последующей точки будет больше потенциала предыдущей на величину напряжения этого источника.

$$\varphi_A = \varphi_O + (E - I \cdot r_{01}). \quad (21)$$

Если на участке между двумя точками включен приемник электрической энергии, то потенциал последующей точки будет меньше потенциала предыдущей на величину падения напряжения на этом участке.

$$\varphi_B = \varphi_A - I \cdot R_1. \quad (22)$$

Запишем уравнения для потенциалов остальных точек цепи:

$$\varphi_B = \varphi_B + (E_2 - I \cdot r_{02}); \quad (23)$$

$$\varphi_\Gamma = \varphi_B - I R_2; \quad (24)$$

$$\varphi_\Delta = \varphi_\Gamma - (E_3 + I \cdot r_{03}); \quad (25)$$

$$\varphi_{\text{Ж}} = \varphi_\Delta - I \cdot R_3; \quad (26)$$

$$\varphi_3 = \varphi_{\text{Ж}} + (E_4 - I \cdot r_{04}). \quad (27)$$

Так как на участке между точками 3 и O нет ни источников, ни приемников электрической энергии, то $\varphi_3 = \varphi_O = 0$.

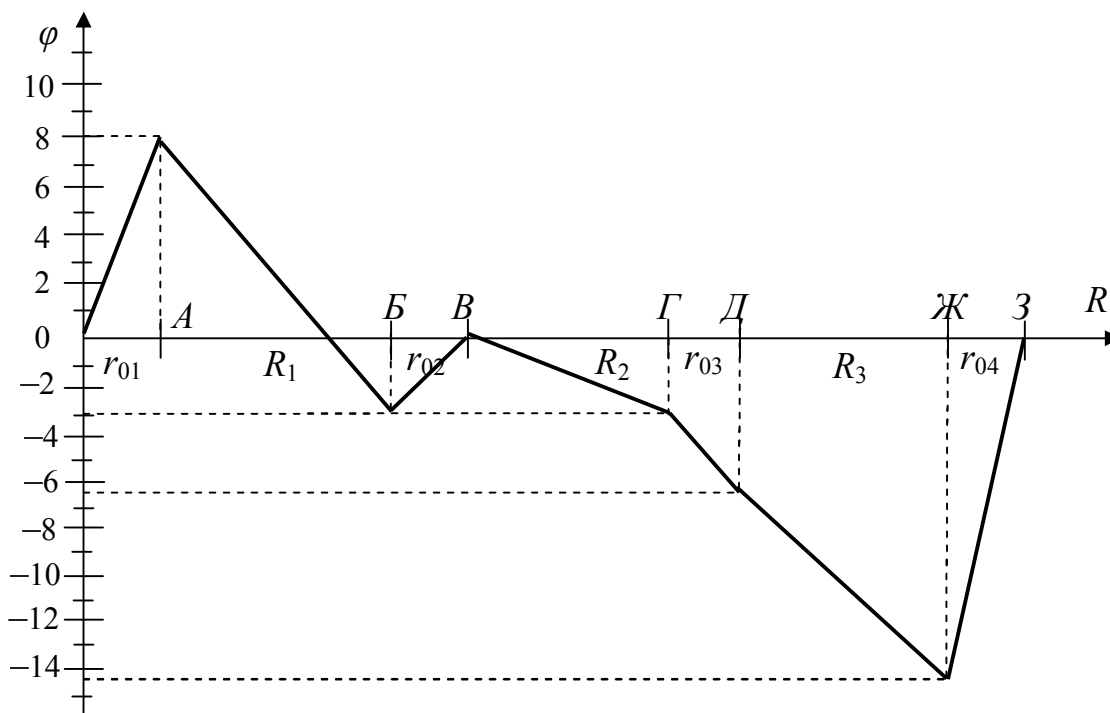


Рис. 7. Потенциальная диаграмма

Потенциальная диаграмма представляет собой график зависимости потенциалов точек цепи от величины сопротивлений участков между этими точками (рис. 7).

Потенциальная диаграмма строится в масштабе. По горизонтальной оси откладываются величины сопротивлений последовательно друг за другом по обходу контура. По вертикальной оси откладываются потенциалы точек.

Допустим, что в результате расчета получились такие потенциалы:

$$\varphi_O=0; \varphi_A=8,2 \text{ В}; \varphi_B=-3 \text{ В}; \varphi_B=0; \varphi_I=-3 \text{ В}; \varphi_D=-6,2 \text{ В}; \varphi_{\text{Ж}}=-14,2 \text{ В}; \varphi_3=0.$$

Отметив эти точки в координатной системе и соединив их отрезками прямых линий, получим потенциальную диаграмму (см. рис. 7).

Имея потенциальную диаграмму или величины потенциалов точек цепи, легко определить напряжение между заданными точками.

$$\text{Например, } U_{BD} = \varphi_B - \varphi_D = -3 - (-6,2) = 3,2 \text{ В}.$$

Это же напряжение можно определить графически, как показано на диаграмме.

1.6. Анализ электрических цепей с одним источником питания

В большинстве случаев при расчете электрических цепей известными (заданными) величинами являются электродвижущие силы (ЭДС) или напряжения и сопротивления резисторов, неизвестными (рассчитываемыми) величинами являются токи и напряжения приемников.

Рассмотрим простую электрическую цепь, изображенную на рис. 8.

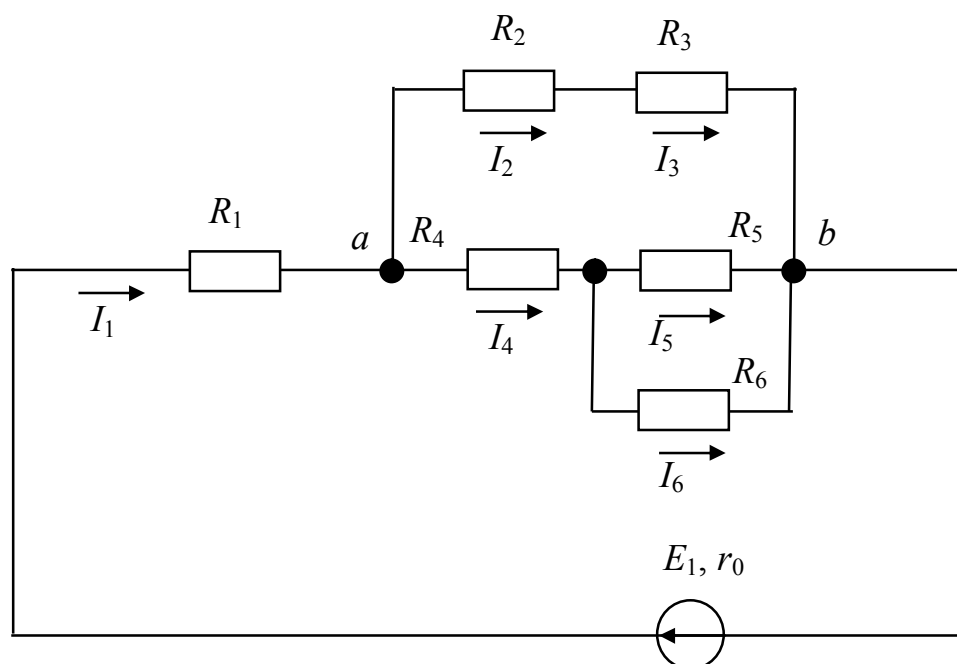


Рис. 8. Схема электрической цепи постоянного тока

Пусть известны величины сопротивлений $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$, ЭДС E источника и его внутреннее сопротивление r_0 . Требуется определить токи во всех участках цепи.

Задачи подобного рода решаются путем свертывания схемы и доведения ее до схемы с одним эквивалентным сопротивлением, т.е. производят замену последовательно и параллельно соединенных сопротивлений одним эквивалентным.

Сопротивления R_5 и R_6 соединены параллельно, их эквивалентное сопротивление будет равно

$$R_{56} = \frac{R_5 \cdot R_6}{R_5 + R_6}. \quad (28)$$

Сопротивление R_{56} соединено последовательно с R_4 , следовательно, эквивалентное сопротивление ветви, состоящей из сопротивлений R_4, R_5, R_6 , будет равно

$$R_{456} = R_4 + R_{56}. \quad (29)$$

Эквивалентное сопротивление, заменяющее сопротивления R_2 и R_3 , будет равно

$$R_{23} = R_2 + R_3. \quad (30)$$

После произведенных преобразований схема электрической цепи упрощается (рис. 9).

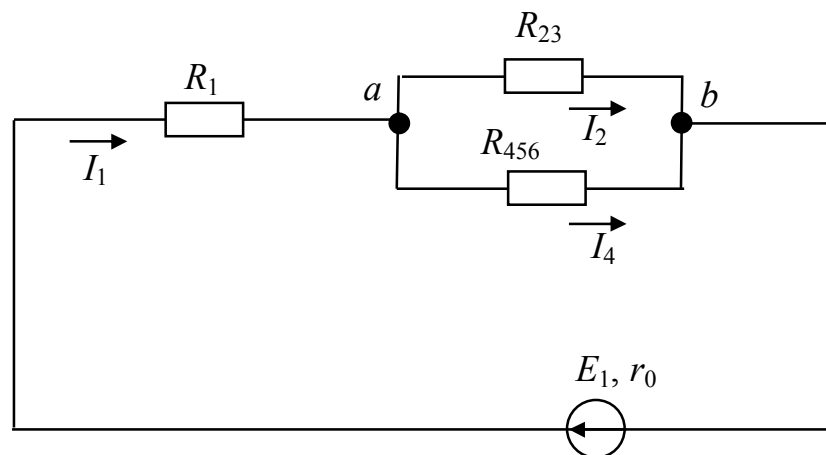


Рис. 9. Схема электрической цепи постоянного тока после преобразования

Эквивалентное сопротивление преобразованной схемы

$$R_{\text{ЭКВ}} = R_1 + \frac{R_{23} \cdot R_{456}}{R_{23} + R_{456}}. \quad (31)$$

Ток I_1 определим по закону Ома

$$I_1 = \frac{E}{R_{\text{ЭКВ}} + r_0}. \quad (32)$$

Определим напряжение между узлами a и b :

$$U_{ab} = I_1 \cdot R_{ab}, \quad (33)$$

где

$$R_{ab} = \frac{R_{23} \cdot R_{456}}{R_{23} + R_{456}}. \quad (34)$$

По закону Ома для участка цепи ab определим токи:

$$I_2 = I_3 = \frac{U_{ab}}{R_{23}}; \quad (35)$$

$$I_4 = \frac{U_{ab}}{R_{456}}. \quad (36)$$

Ток I_4 определим и по первому закону Кирхгофа.

$$I_4 = I_1 - I_2. \quad (37)$$

Схема, изображенная на рис. 8, позволяет определить токи I_5 , I_6 . Для этого сначала вычислим напряжение U_{56} на параллельном участке R_{56} .

$$U_{56} = I_4 \cdot R_{56}. \quad (38)$$

Токи I_5 , I_6 определим по закону Ома:

$$I_5 = \frac{U_{56}}{R_5}; \quad (39)$$

$$I_6 = \frac{U_{56}}{R_6}. \quad (40)$$

Ток I_6 определим и по первому закону Кирхгофа.

$$I_6 = I_4 - I_5. \quad (41)$$

Если известен ток до разветвления, то токи в параллельных ветвях можно определить и другим способом. Например, известен ток I_4 , требуется определить токи I_5 , I_6 .

Согласно первому закону Кирхгофа

$$I_4 = I_5 + I_6. \quad (42)$$

Согласно второму закону Кирхгофа

$$I_5 \cdot R_5 = I_6 \cdot R_6. \quad (43)$$

Из уравнений (42) и (43)

$$I_5 = I_4 \cdot \frac{R_6}{R_5 + R_6}. \quad (44)$$

Для проверки правильности решения воспользуемся уравнением баланса мощностей, которое для исходной схемы (см. рис. 8) запишется следующим образом:

$$E \cdot I_1 = I_1^2 \cdot (r_0 + R_1) + I_2^2 \cdot (R_2 + R_3) + I_4^2 \cdot R_4 + I_5^2 \cdot R_5 + I_6^2 \cdot R_6. \quad (45)$$

1.7. Анализ сложных электрических цепей с несколькими источниками питания

Для расчета сложных электрических цепей применяются законы Кирхгофа.

Согласно первому закону Кирхгофа для цепей постоянного тока алгебраическая сумма токов в любом узле электрической цепи равна нулю.

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0, \quad (46)$$

т.е. сумма токов, направленных от узла, равна сумме токов, направленных к узлу. При составлении уравнений токи, направленные к узлу, берутся с одним знаком, а токи, направленные от узла, – с противоположным.

Например, для узла электрической цепи на рис. 10 уравнение, составленное по первому закону Кирхгофа, будет иметь вид

$$I_1 + I_2 + I_4 = I_3 + I_5, \quad (47)$$

или

$$I_1 + I_2 - I_3 + I_4 - I_5 = 0. \quad (48)$$

Согласно второму закону Кирхгофа для цепей постоянного тока в любом замкнутом контуре алгебраическая сумма напряжений на резистивных элементах равна алгебраической сумме ЭДС

$$\sum_{k=1}^m I_k R_k = \sum_{k=1}^n E_k, \quad (49)$$

где m – число резистивных элементов;
 n – число источников ЭДС в контуре.

Со знаком «плюс» записываются

ЭДС и токи, направления которых совпадают с произвольно выбранным направлением обхода контура, а со знаком «минус» – ЭДС и токи, направления которых противоположны выбранному направлению обхода.

Рассмотрим сложную электрическую цепь (рис. 11), содержащую 6 ветвей. В том случае, когда по условию задачи заданы величины всех ЭДС и сопротивлений, а требуется определить токи в ветвях, то получается задача с шестью неизвестными.

Подобного рода задачи решаются с использованием законов Кирхгофа. При этом должно быть составлено столько уравнений, сколько неизвестных токов.

Порядок расчета.

1. С целью упрощения последовательные и параллельные соединения сопротивлений, содержащиеся в цепи, заменяются эквивалентными.

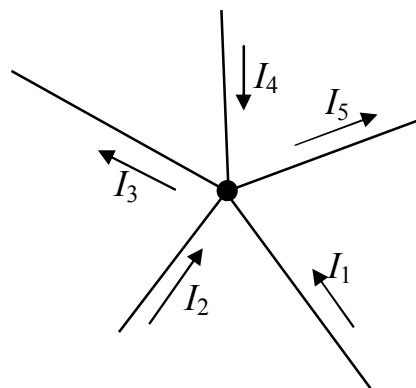


Рис. 10. Узел электрической цепи

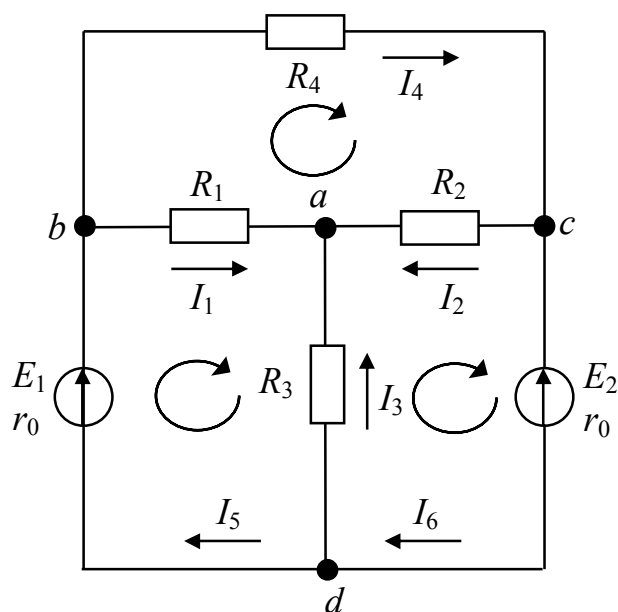


Рис. 11. Сложная электрическая цепь

В качестве примера составим систему уравнений для схемы на рис. 11. Для выбранных направлений токов запишем уравнения по первому закону Кирхгофа для узлов a , b , c :

$$\left. \begin{aligned} I_1 + I_2 + I_3 &= 0; \\ I_5 - I_1 - I_4 &= 0; \\ I_4 - I_2 - I_6 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (50)$$

Приняв направление обхода контуров по часовой стрелке, составим уравнения по второму закону Кирхгофа для трех произвольно выбранных контуров:

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= I_1 R_1 - I_3 R_3 + I_5 r_{01}; \\ E_1 - E_2 &= I_1 R_1 - I_2 R_2 + I_5 r_{01} + I_6 r_{02}; \\ 0 &= -I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_4 R_4. \end{aligned} \right\} \quad (51)$$

Решая уравнения (50) и (51) совместно как систему, определим токи в ветвях.

Легко заметить, что решение полученной системы уравнений без применения современных вычислительных средств является весьма трудоемкой операцией. Поэтому при анализе электрических цепей с несколькими источниками питания трехконтурную схему обычно преобразуют в двухконтурную заменой «треугольника» сопротивлений эквивалентной «звездой». При этом «треугольник» сопротивлений, входящий в состав сложной схемы, не должен содержать источников ЭДС.

В качестве примера проведем преобразование «треугольника» abc в схеме на рис. 11 в эквивалентную «звезду» (рис. 12). Исходный «треугольник» образован сопротивлениями R_1 , R_2 , R_4 . При преобразовании

2. Произвольно указываются направления токов во всех ветвях. Если принятое направление тока не совпадает с действительным, в результате расчета такой ток оказывается отрицательным.

3. Составляются уравнения по первому закону Кирхгофа, количество которых равно $(n-1)$, где n – количество узлов в схеме.

4. Остальные уравнения составляются по второму закону Кирхгофа. При этом направления обхода контуров выбираются произвольно. Положительными считаются ЭДС и токи, направления которых совпадают с

обязательно сохраняется условие эквивалентности схем, т.е. токи в проводах, подходящих к преобразуемой схеме, и напряжения между узлами не меняют своих величин.

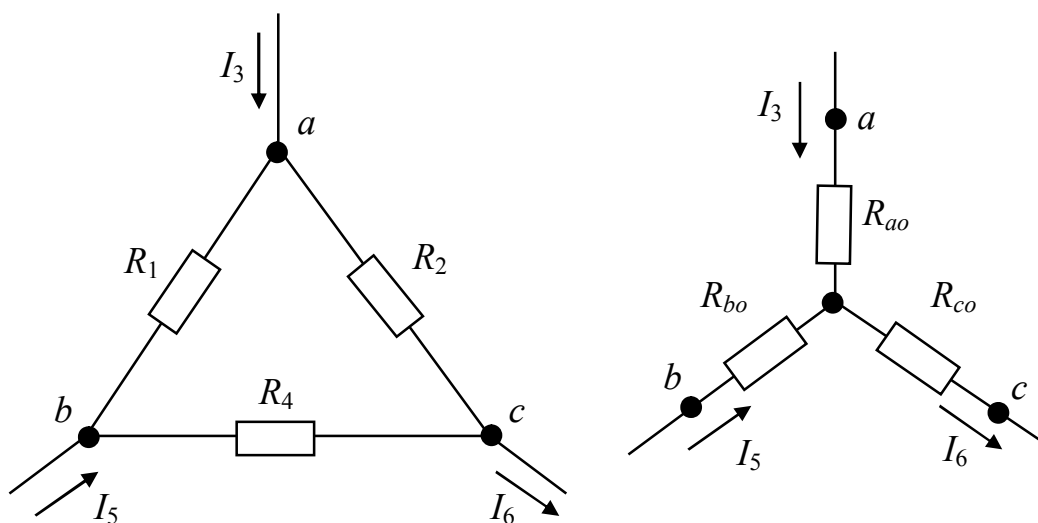


Рис. 12. Преобразование «треугольника» сопротивлений в эквивалентную «звезду»

При преобразовании «треугольника» в «звезду» используются расчетные формулы:

$$\left. \begin{aligned} R_{ao} &= \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_4}; \\ R_{bo} &= \frac{R_1 \cdot R_4}{R_1 + R_2 + R_4}; \\ R_{co} &= \frac{R_2 \cdot R_4}{R_1 + R_2 + R_4}. \end{aligned} \right\} \quad (52)$$

В результате преобразования исходная схема (см. рис. 10) упрощается (рис. 13).

В преобразованной схеме только три ветви и соответственно три тока I_3 , I_5 , I_6 . Для расчета этих токов достаточно иметь систему из трех уравнений, составленных по законам Кирхгофа:

$$\left. \begin{aligned} I_5 + I_3 - I_6 &= 0; \\ E_1 &= I_5(R_{bo} + r_{01}) - I_3(R_3 + R_{ao}); \\ -E_2 &= I_3(R_3 + R_{ao}) + I_6(R_{co} + r_{02}). \end{aligned} \right\} \quad (53)$$

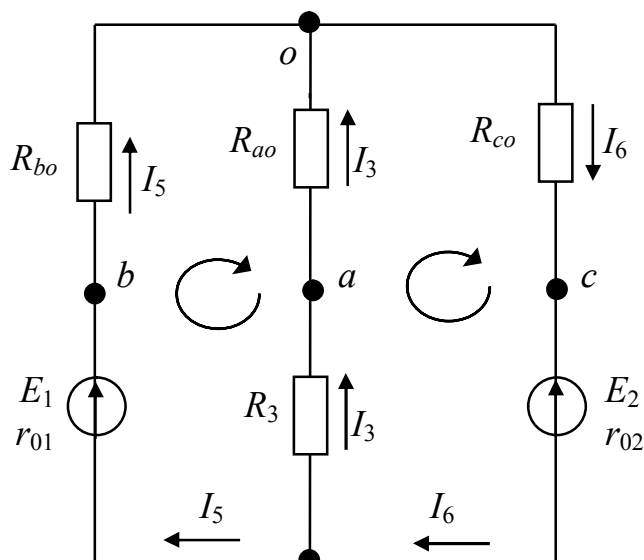


Рис. 13. Преобразованная схема после замены «треугольника» сопротивлений эквивалентной «звездой»

уравнений равно количеству ячеек. Ячейкой называется такой контур, внутри которого отсутствуют ветви. В рассматриваемой схеме (рис. 14) таких контуров-ячеек три.

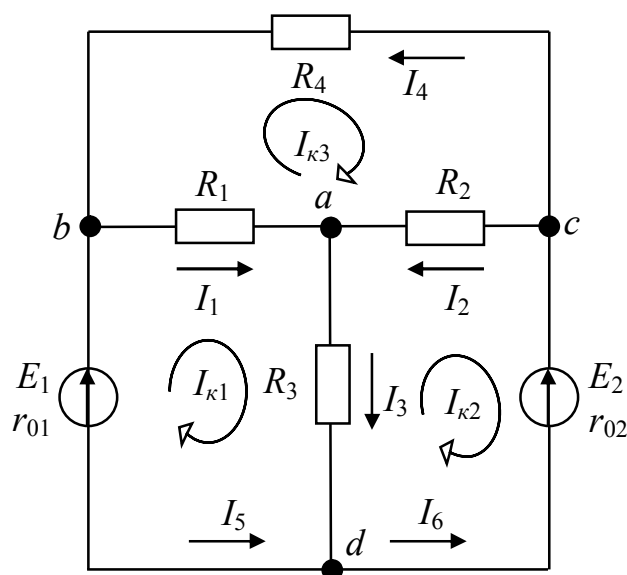


Рис. 14. Схема к расчету электрической цепи методом контурных токов

При составлении уравнений направление токов и обхода контуров выбираются так же, как в трехконтурной схеме. Решив систему уравнений (53), определим токи I_3 , I_5 , I_6 .

Подстановкой полученных значений токов в уравнения, составленные для трехконтурной схемы, определим остальные токи: I_1 , I_2 , I_4 .

Часто для расчета сложных электрических цепей применяется *метод контурных токов*. При решении этим методом

Расчет сложных электрических цепей методом контурных токов ведется следующим образом.

1. Вводя понятие «контурный ток», произвольно задаемся направлением контурных токов в ячейках. Удобнее все токи указать в одном направлении, например по часовой стрелке (см. рис. 14).

2. Составляем для каждого контура-ячейки уравнение по второму закону Кирхгофа, обходя контур по часовой стрелке.

$$E_1 = I_{\kappa 1} \cdot (R_1 + R_3 + r_{01}) - I_{\kappa 2} \cdot R_3 - I_{\kappa 3} \cdot R_1; \quad (54)$$

уравнение для второго контура

$$-E_2 = I_{\kappa 2} \cdot (R_2 + R_3 + r_{02}) - I_{\kappa 1} \cdot R_3 - I_{\kappa 3} \cdot R_2; \quad (55)$$

уравнение для третьего контура

$$0 = I_{\kappa 3}(R_2 + R_3 + R_4) - I_{\kappa 1}R_1 - I_{\kappa 2}R_2. \quad (56)$$

3. Решая уравнения (54), (55), (56) совместно как систему, определяем контурные токи. Если контурный ток оказался отрицательным, значит, его направление противоположно выбранному на схеме.

4. Токи во внутренних ветвях схемы I_1, I_2, I_3 определяются как сумма или разность соответствующих контурных токов. Если контурные токи в ветви совпадают по направлению, берется их сумма; если не совпадают, берется их разность.

5. Токи во внешних ветвях схемы I_4, I_5, I_6 равны соответствующим контурным токам.

1.8. Пример расчета сложной электрической цепи

Имеется цепь постоянного тока, схема которой изображена на рис. 14.

Дано: $E_1=100$ В; $E_2=120$ В; $r_{01}=r_{02}=0,5$ Ом; $R_1=5$ Ом; $R_2=10$ Ом; $R_3=2$ Ом; $R_4=10$ Ом.

Определить токи в ветвях.

Решение.

Используя уравнения (54), (55), (56), получаем:

$$\left. \begin{aligned} 100 &= 7,5I_{\kappa 1} - 2I_{\kappa 2} - 5I_{\kappa 3}; \\ -120 &= -2I_{\kappa 1} + 12,5I_{\kappa 2} - 10I_{\kappa 3}; \\ 0 &= -5I_{\kappa 1} - 10I_{\kappa 2} + 25I_{\kappa 3}. \end{aligned} \right\}$$

Выразим $I_{\kappa 3}$ через $I_{\kappa 1}$ и $I_{\kappa 2}$:

$$I_{\kappa 3} = \frac{5}{25}I_{\kappa 1} + \frac{10}{25}I_{\kappa 2}$$

и произведем соответствующие подстановки:

$$\left. \begin{aligned} 100 &= 6,5I_{\kappa 1} - 4I_{\kappa 2}; \\ -120 &= -4I_{\kappa 1} + 8,5I_{\kappa 2}. \end{aligned} \right\}$$

Совместное решение полученных уравнений дает:

$$I_{\kappa 1} = -5,2 \text{ А}; I_{\kappa 2} = -33,5 \text{ А}; I_{\kappa 3} = -14,4 \text{ А}.$$

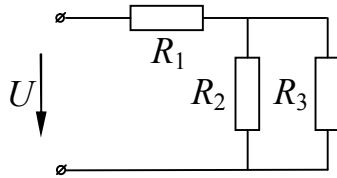
Определяем токи в ветвях:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_{\kappa 1} - I_{\kappa 3} = -5,2 + 14,4 = 9,2 \text{ А}; \\ I_2 &= I_{\kappa 3} - I_{\kappa 2} = -14,4 + 33,5 = 19,1 \text{ А}; \\ I_3 &= I_{\kappa 1} - I_{\kappa 2} = -5,2 + 33,5 = 28,3 \text{ А}; \\ I_4 &= -I_{\kappa 3} = 14,4 \text{ А}; \\ I_5 &= -I_{\kappa 1} = 5,2 \text{ А}; \end{aligned}$$

$$I_6 = -I_{\kappa 2} = 33,5 \text{ A.}$$

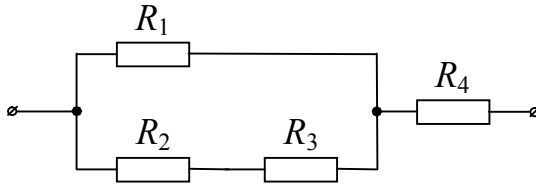
Контрольные вопросы по электрическим цепям постоянного тока

1. Определить эквивалентное сопротивление R_{Σ} , если $R_1=1 \text{ Ом}$; $R_2=R_3=4 \text{ Ом}$.



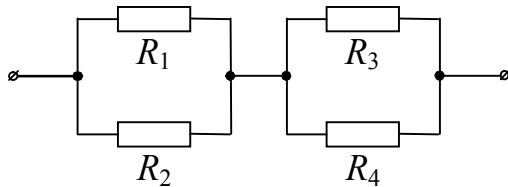
- 1) 9 Ом;
- 2) 3 Ом;
- 3) 4 Ом;
- 4) 5 Ом.

2. Определить эквивалентное сопротивление R_{Σ} , если $R_1=12 \text{ Ом}$; $R_2=8 \text{ Ом}$; $R_3=4 \text{ Ом}$; $R_4=4 \text{ Ом}$.



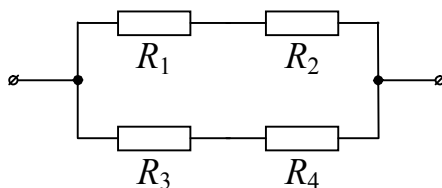
- 1) 12 Ом;
- 2) 6 Ом;
- 3) 10 Ом;
- 4) 8 Ом.

3. Определить эквивалентное сопротивление R_{Σ} , если $R_1=4 \text{ Ом}$; $R_2=4 \text{ Ом}$; $R_3=6 \text{ Ом}$; $R_4=6 \text{ Ом}$.



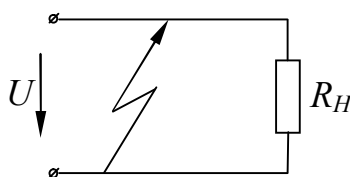
- 1) 10 Ом;
- 2) 5 Ом;
- 3) 12 Ом;
- 4) 8 Ом.

4. Определить эквивалентное сопротивление R_{Σ} , если $R_1=6 \text{ Ом}$; $R_2=4 \text{ Ом}$; $R_3=5 \text{ Ом}$; $R_4=5 \text{ Ом}$.



- 1) 10 Ом;
- 2) 15 Ом;
- 3) 5 Ом;
- 4) 9 Ом.

5. Как изменится ток потребителя R_H при коротком замыкании на линии?



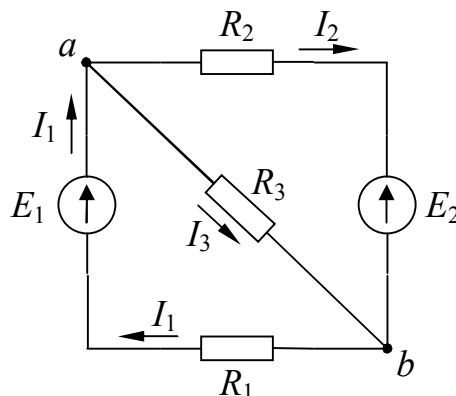
- 1) резко увеличится;
- 2) станет равным нулю;
- 3) уменьшится.

6. Нагревательный прибор с сопротивлением $R=44$ Ом включен в сеть с напряжением $U=220$ В. Найти ток I и мощность P прибора.

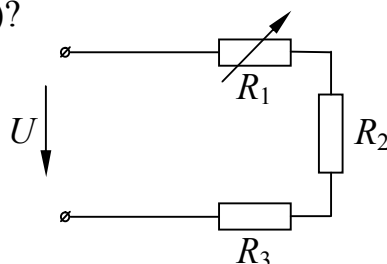
- 1) 2А, 240 Вт; 2) 5А, 600 Вт; 3) 5А, 1100 Вт; 4) 10 А, 600 Вт.

7. Какая из приведенных систем уравнений дает возможность найти неизвестные токи в приведенной схеме?

- 1) $\begin{cases} I_1 - I_2 - I_3 = 0; \\ E_1 = I_1 R_1 + I_3 R_3; \\ -E_2 = I_2 R_2 - I_3 R_3. \end{cases}$
- 2) $\begin{cases} I_1 = I_2 + I_3 = 0; \\ E_1 = I_1 R_1 + I_3 R_3; \\ I_2 + I_3 + I_1 = 0. \end{cases}$
- 3) $\begin{cases} E_1 = I_1 R_1 + I_3 R_3; \\ E_2 = -I_2 R_2 + I_3 R_3; \\ E_1 - E_2 = -I_1 R_1 + I_2 R_2. \end{cases}$



8. Как изменятся напряжения на сопротивлениях R_2 , R_3 и R_1 при увеличении R_1 ($U=\text{const}$)?



- 1) напряжения на R_2 и R_3 увеличатся, а напряжение на R_1 уменьшится;
- 2) напряжения на R_2 и R_3 уменьшатся, а напряжение на R_1 увеличится;
- 3) напряжения на R_2 и R_3 не изменятся, а на R_1 увеличится;
- 4) напряжения на R_2 и R_3 не изменятся, а напряжение на R_1 уменьшится.

9. Какое сопротивление должна иметь спираль нагревательного элемента, если его потребляемая мощность $P=1$ кВт, а напряжение сети $U=220$ В.

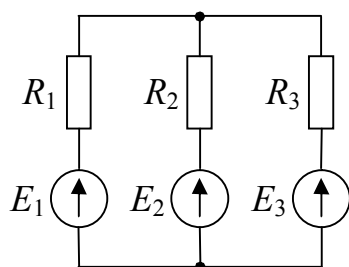
- 1) 0,22 Ом; 2) 48,4 Ом; 3) 100 Ом.

10. Как включают в электрическую цепь амперметр, вольтметр?

- 1) Амперметр последовательно с нагрузкой, вольтметр параллельно нагрузке;
- 2) амперметр и вольтметр последовательно с нагрузкой;

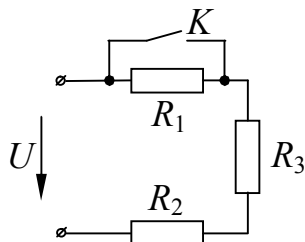
3) амперметр и вольтметр параллельно нагрузке.

11. Определить, какие из трех источников ЭДС генерируют энергию, а какие потребляют, если $R_1=6\ \text{Ом}$; $R_2=8\ \text{Ом}$; $R_3=3\ \text{Ом}$; $E_1=10\ \text{В}$; $E_2=30\ \text{В}$; $E_3=30\ \text{В}$.



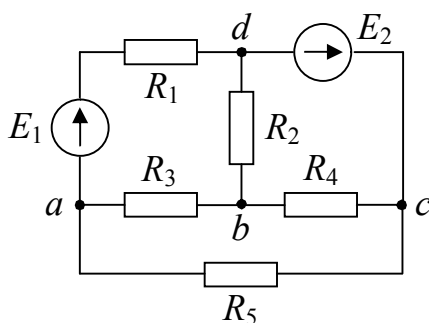
- 1) E_1 – генер., E_2 и E_3 – потр.;
- 2) E_2 – генер., E_1 и E_3 – потр.;
- 3) E_2 и E_3 – генер., E_1 – потр.;
- 4) E_3 – генер., E_1 и E_2 – потр.;
- 5) E_1 и E_3 – генер., E_2 – потр.

12. Как изменится ток в цепи при замыкании ключа K (напряжение $U=\text{const}$)?



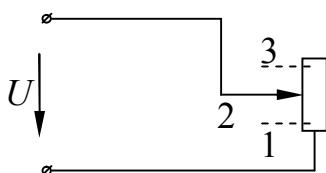
- 1) увеличится;
- 2) уменьшится;
- 3) не изменится.

13. Сколько узловых и контурных уравнений по методам законов Кирхгофа необходимо составить для определения неизвестных токов в этой схеме?



- 1) 4 узловых и 4 контурных;
- 2) 3 узловых и 3 контурных;
- 3) 4 узловых и 2 контурных.

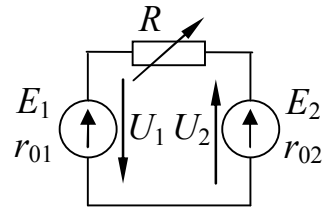
14. Укажите положение движка реостата, соответствующее максимальной нагрузке.



- 1) 1; 2) 2; 3) 3.

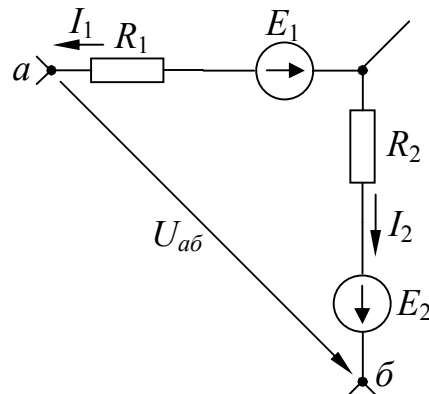
15. Как изменятся напряжения U_1 и U_2 на зажимах источников при уменьшении сопротивления R ?

- 1) U_1 увеличится; U_2 уменьшится;
- 2) U_1, U_2 увеличатся;
- 3) U_1 уменьшится; U_2 увеличится;
- 4) U_1, U_2 уменьшатся.



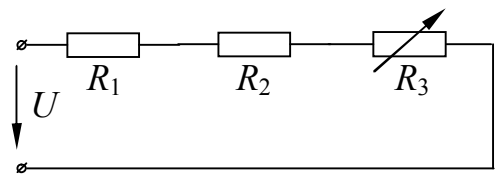
16. На рисунке показана часть сложной цепи. Определите напряжение U_{ab} .

- 1) $U_{ab} = E_1 + E_2 - I_1 R_1 + I_2 R_2$;
- 2) $U_{ab} = -E_1 + E_2 - I_1 R_1 + I_2 R_2$;
- 3) $U_{ab} = I_1 R_1 - I_2 R_2 - E_1 - E_2$;
- 4) $U_{ab} = E_1 + E_2 - I_1 R_1 - I_2 R_2$;
- 5) $U_{ab} = -I_1 R_1 + I_2 R_2 - E_1 - E_2$.



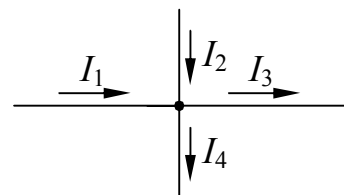
17. В приведенной схеме сопротивление R_3 резко увеличилось. Как изменятся напряжения на всех участках цепи при условии, что $U = \text{const}$?

- 1) на R_3 увеличится, на R_2 и R_1 уменьшится;
- 2) на R_3 уменьшится, на R_2 и R_1 увеличится;
- 3) на R_3 увеличится, на R_2 и R_1 не изменится.

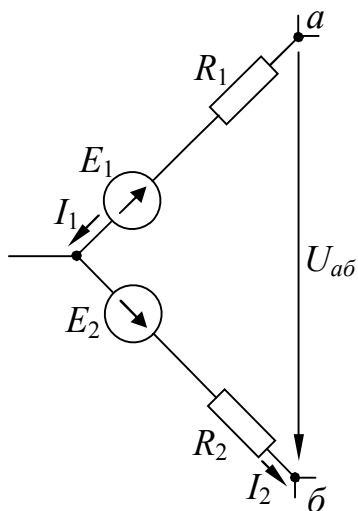


18. Какое из приведенных уравнений не соответствует рисунку?

- 1) $I_1 + I_2 = I_3 + I_4$;
- 2) $I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = 0$;
- 3) $I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 0$;
- 4) $I_3 + I_4 - I_1 - I_2 = 0$.



19. На рисунке показана часть сложной цепи. Задано: $I_1=3$ А; $I_2=2,4$ А; $E_1=70$ В; $E_2=20$ В; $R_1=8$ Ом; $R_2=5$ Ом. Найти напряжение $U_{a\bar{o}}$.



1) $U_{a\bar{o}} = -62$ В;

2) $U_{a\bar{o}} = -86$ В;

3) $U_{a\bar{o}} = 14$ В;

4) $U_{a\bar{o}} = 86$ В;

5) $U_{a\bar{o}} = -14$ В.

Задание на самостоятельную работу по электрическим цепям постоянного тока

Для заданной электрической цепи по заданным в табл. 1 сопротивлениям и ЭДС выполнить следующее:

1. Произвольно задавшись направлением тока, проходящего через каждый элемент цепи, и направлением обхода контуров составить систему уравнений, необходимых для определения токов по первому и второму законам Кирхгофа.

2. Преобразовать исходную трехконтурную схему в двухконтурную, заменив «треугольник» сопротивлений эквивалентной «звездой».

3. Для двухконтурной схемы составить систему уравнений для расчета токов, используя законы Кирхгофа. Рассчитать эти токи.

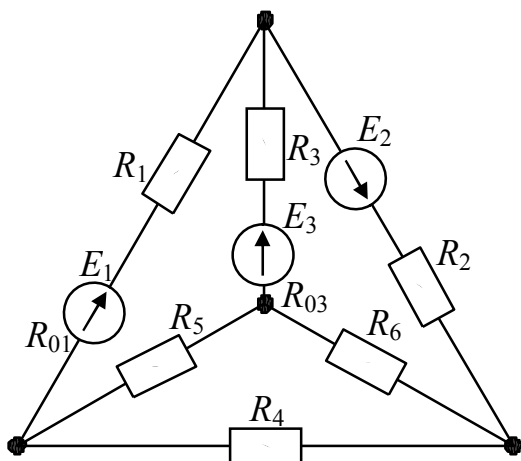
4. Используя данные значения токов, рассчитать все токи, проходящие через каждый элемент цепи в трехконтурной схеме.

5. Изобразить исходную трехконтурную схему и, задав направления контурных токов, составить уравнения по методу контурных токов.

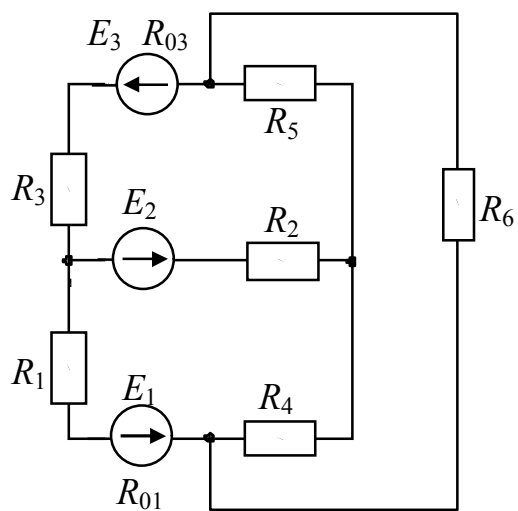
6. Используя значения контурных токов, определить токи, проходящие через каждый элемент цепи.

7. Составить баланс мощностей для заданной схемы.

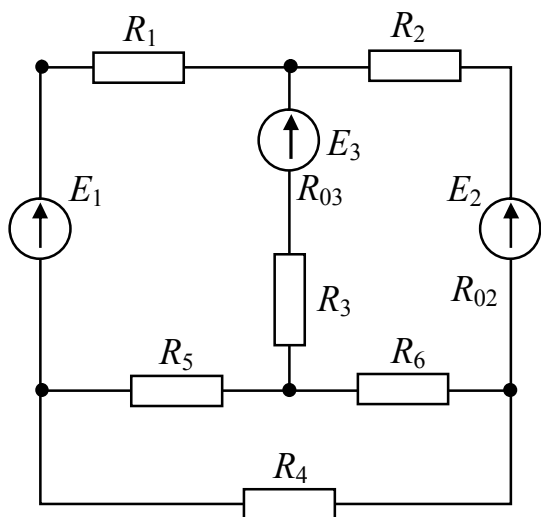
8. Построить в масштабе потенциальную диаграмму для внешнего контура.



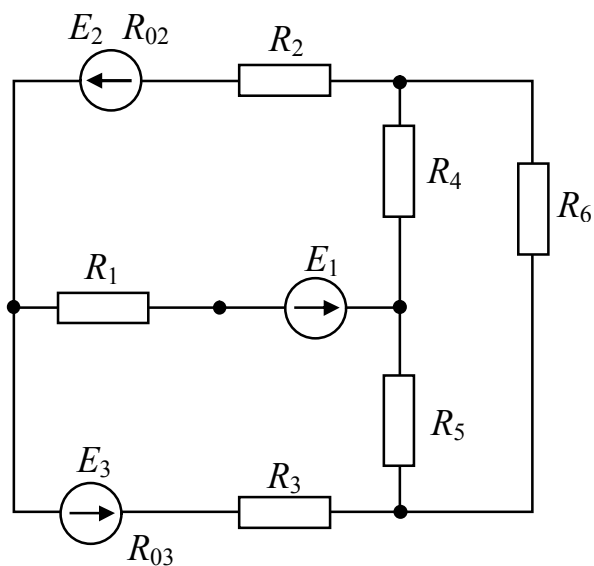
Вариант 1



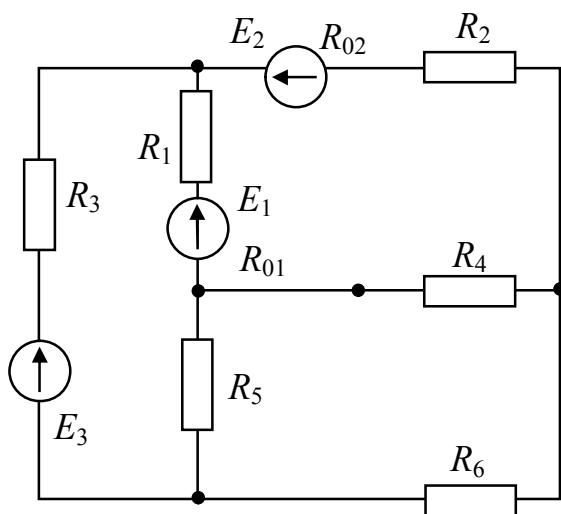
Вариант 2



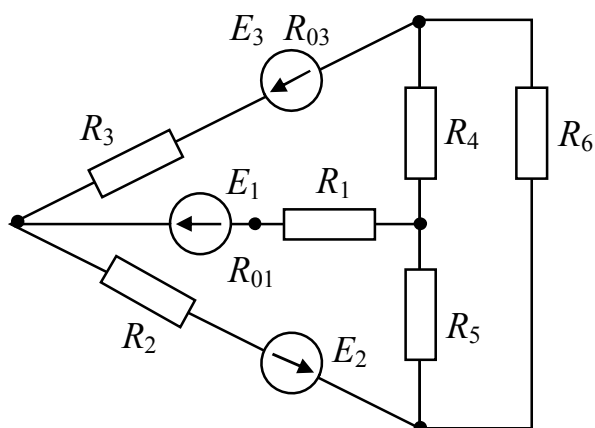
Вариант 3



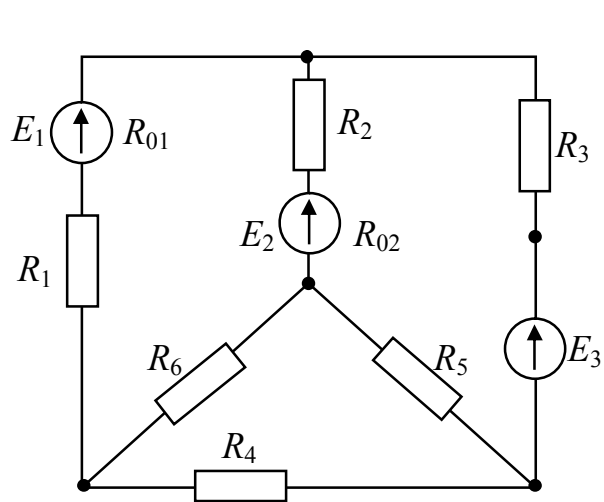
Вариант 4



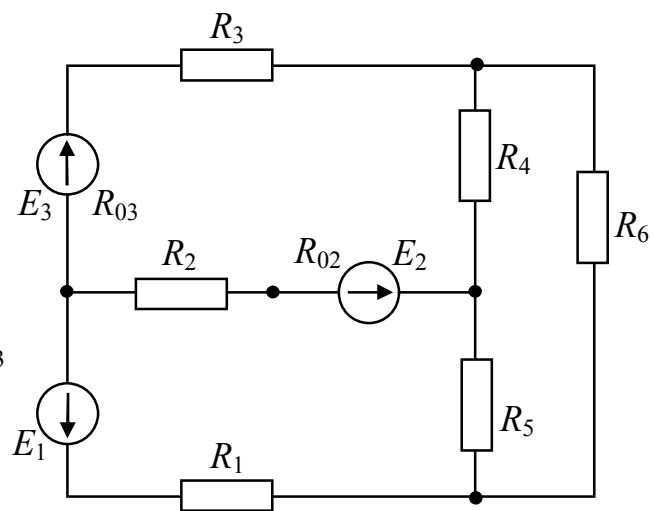
Вариант 5



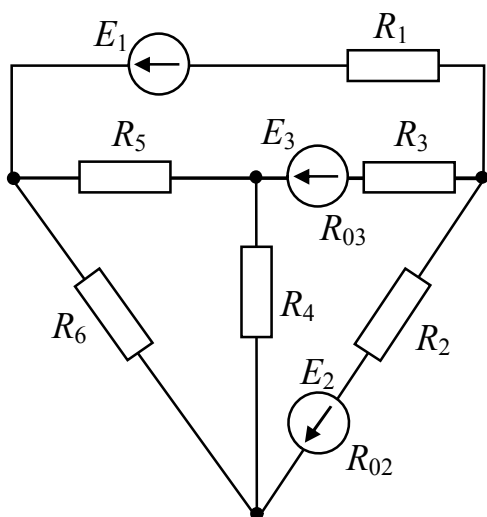
Вариант 6



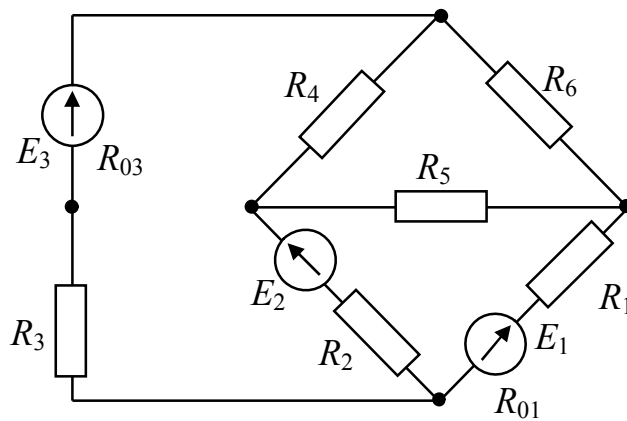
Вариант 7



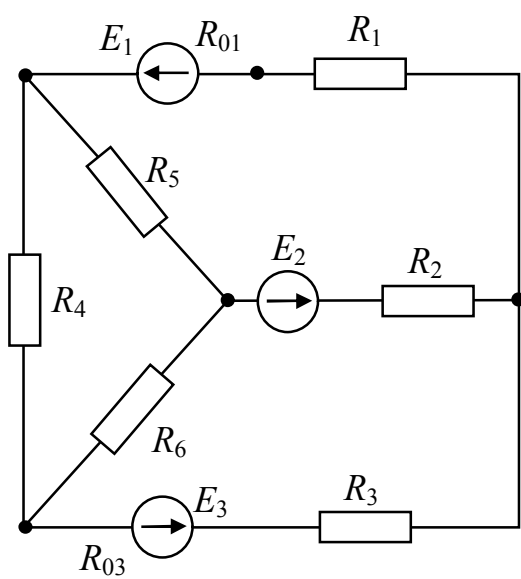
Вариант 8



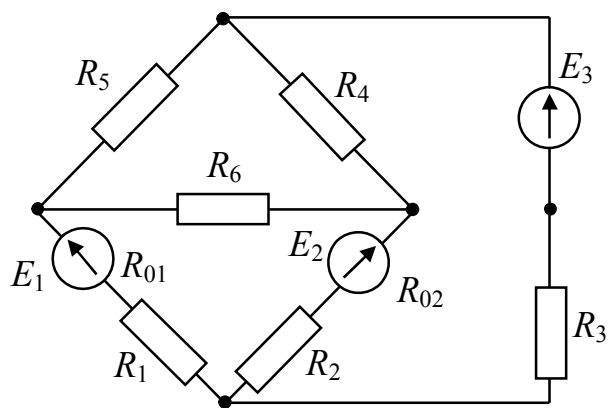
Вариант 9



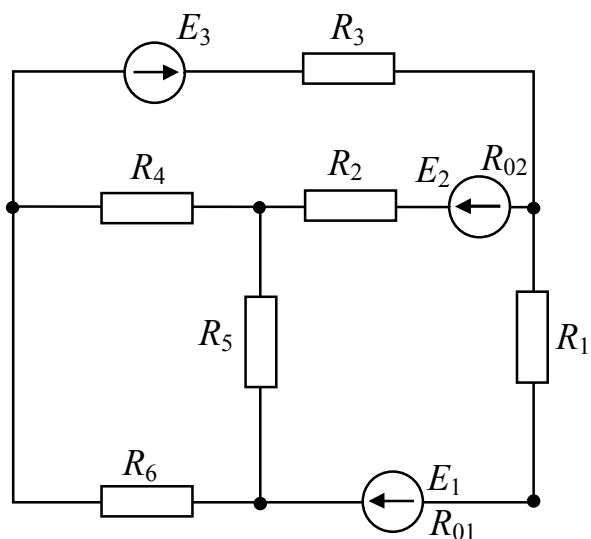
Вариант 10



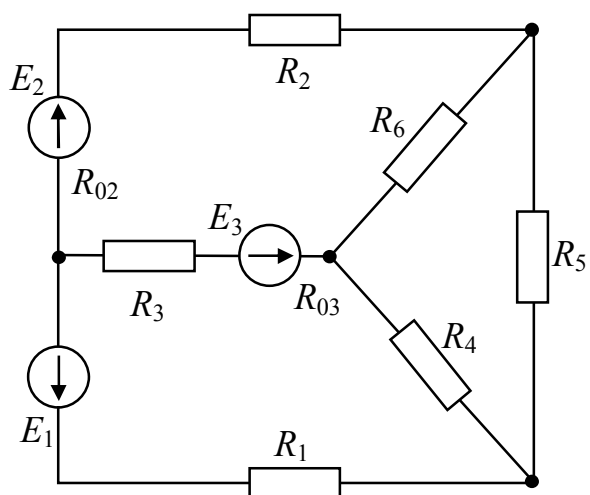
Вариант 11



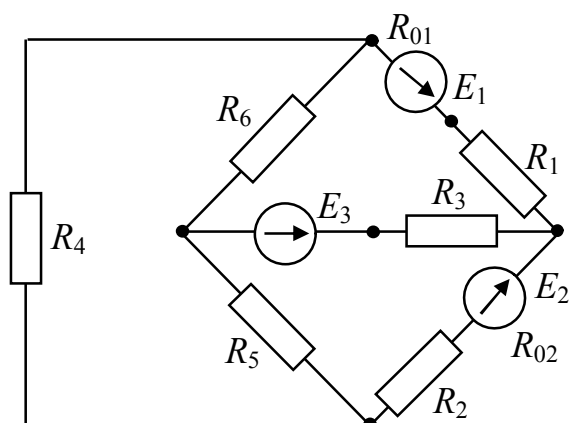
Вариант 12



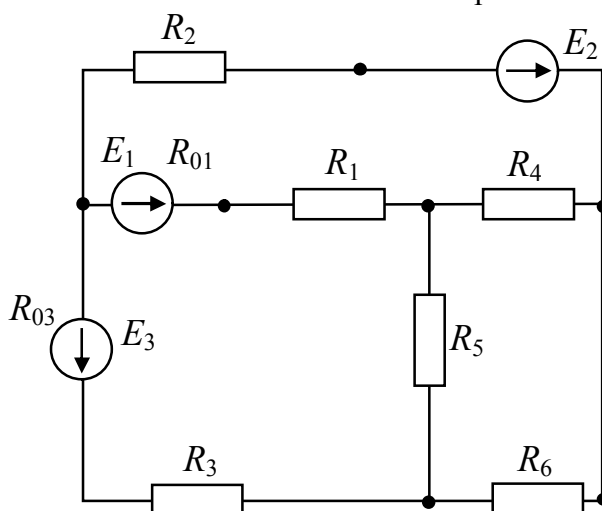
Вариант 13



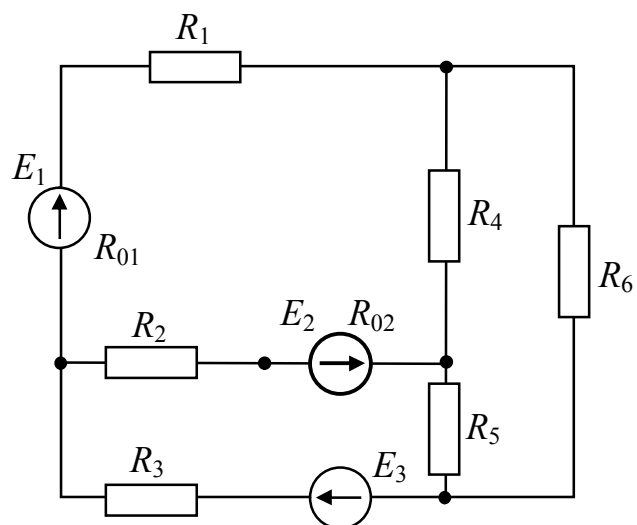
Вариант 14



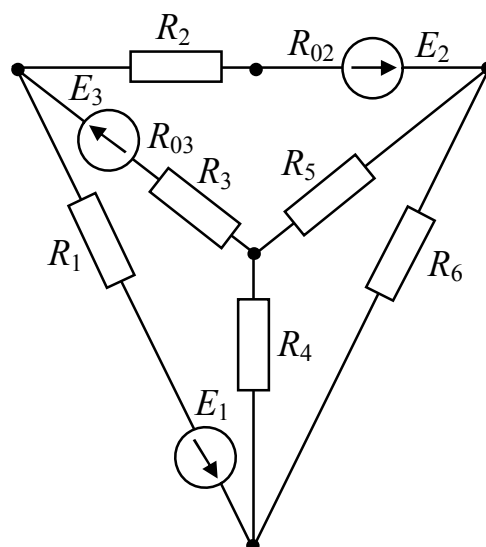
Вариант 15



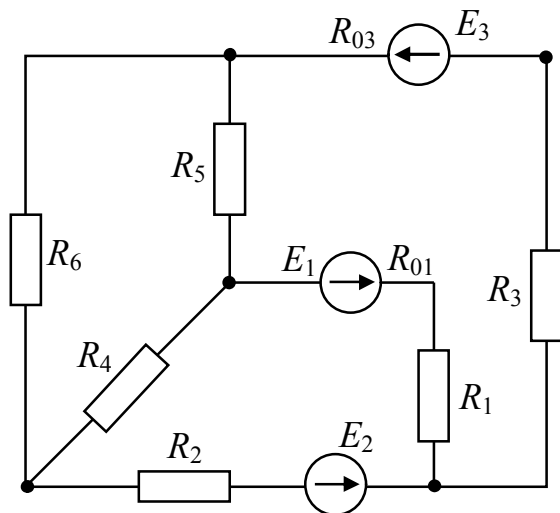
Вариант 16



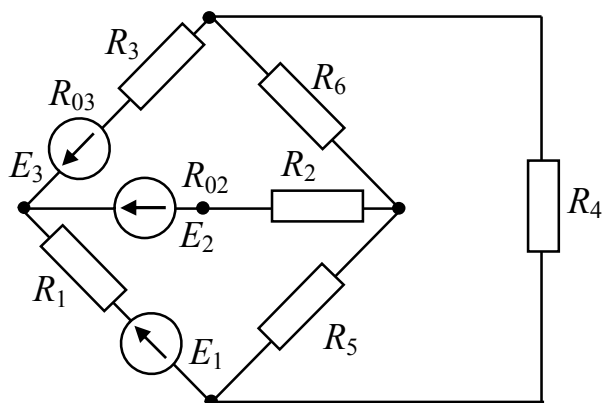
Вариант 17



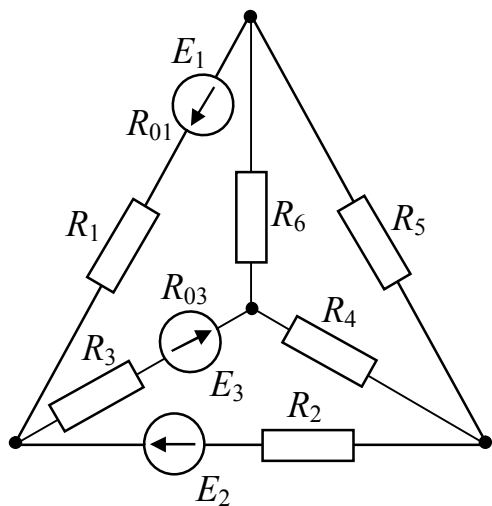
Вариант 18



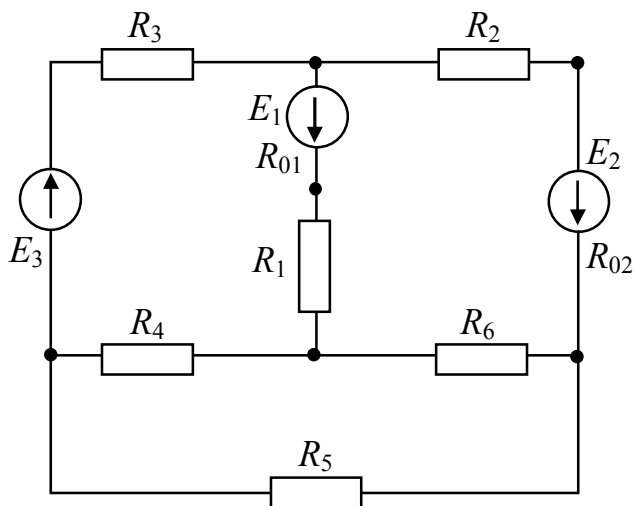
Вариант 19



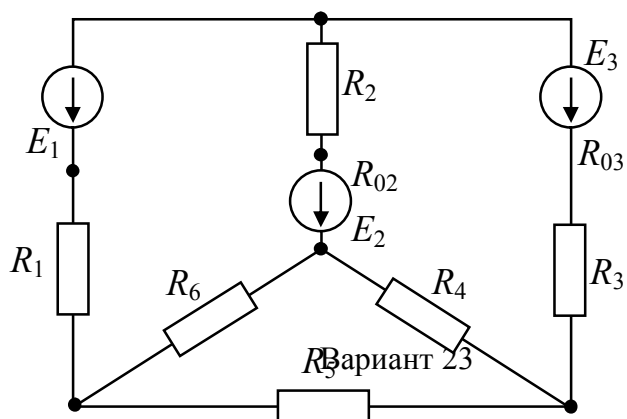
Вариант 20



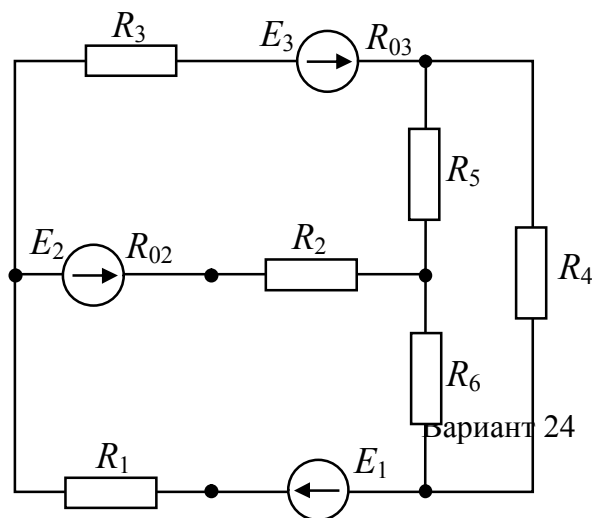
Вариант 21



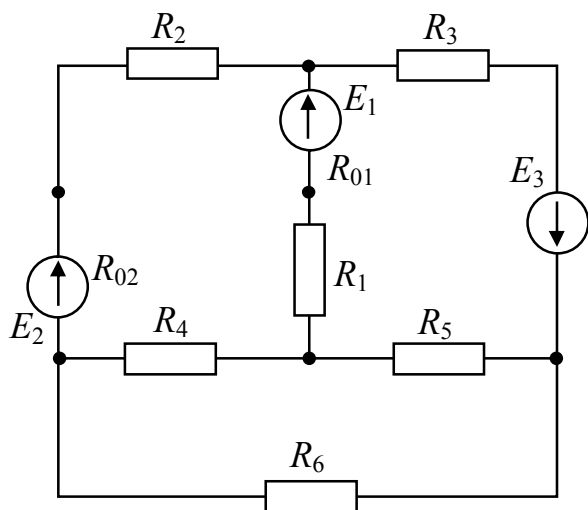
Вариант 22



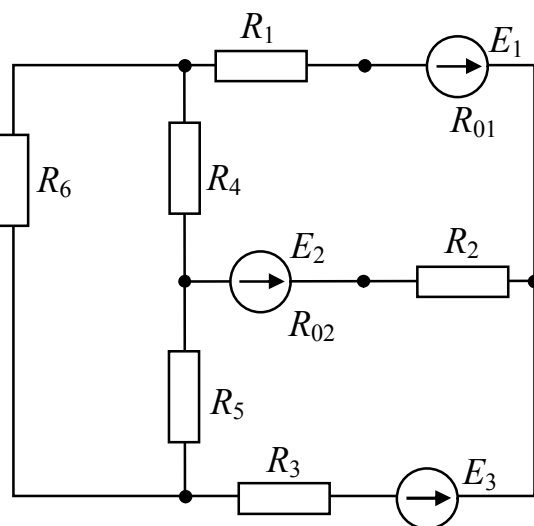
Вариант 23



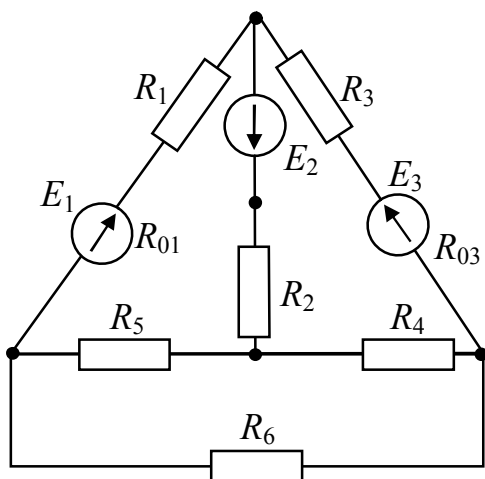
Вариант 24



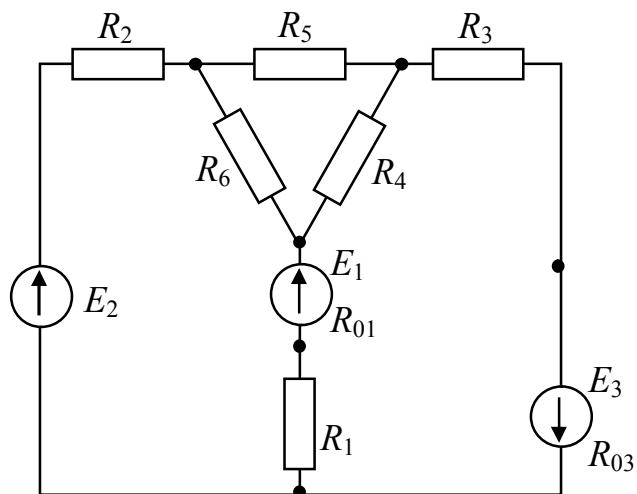
Вариант 25



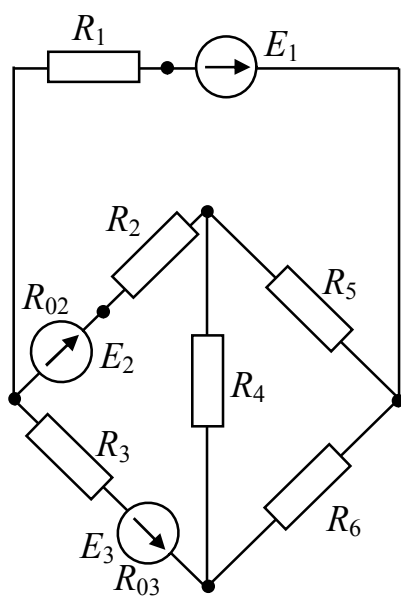
Вариант 26



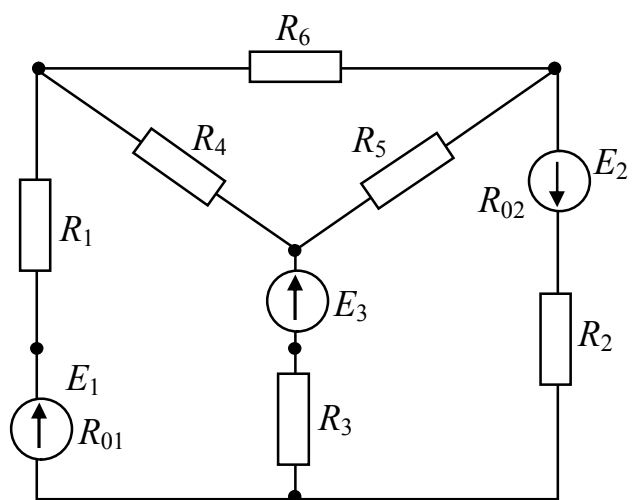
Вариант 27



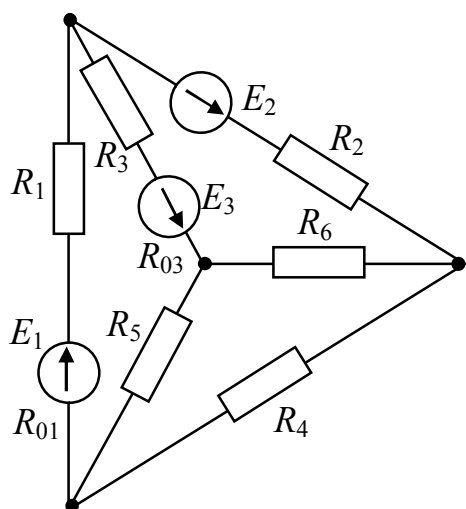
Вариант 28



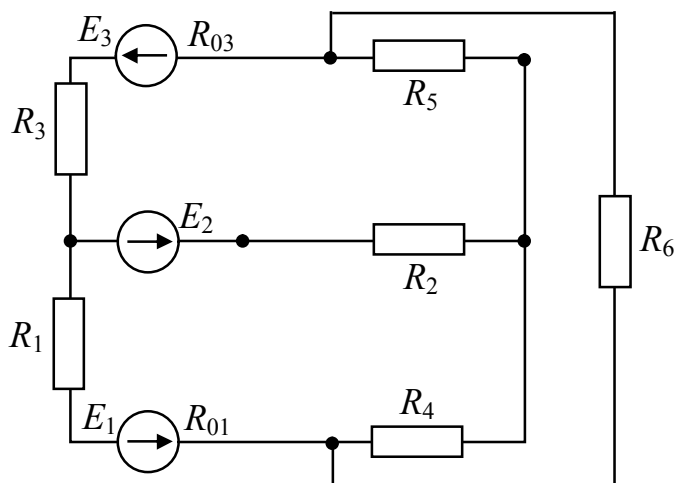
Вариант 29



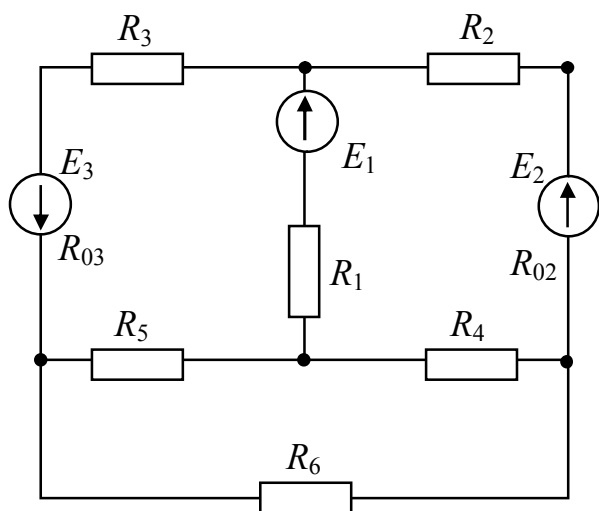
Вариант 30



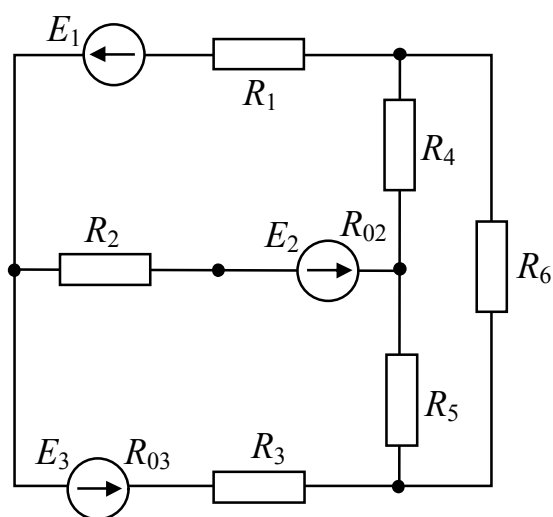
Вариант 31



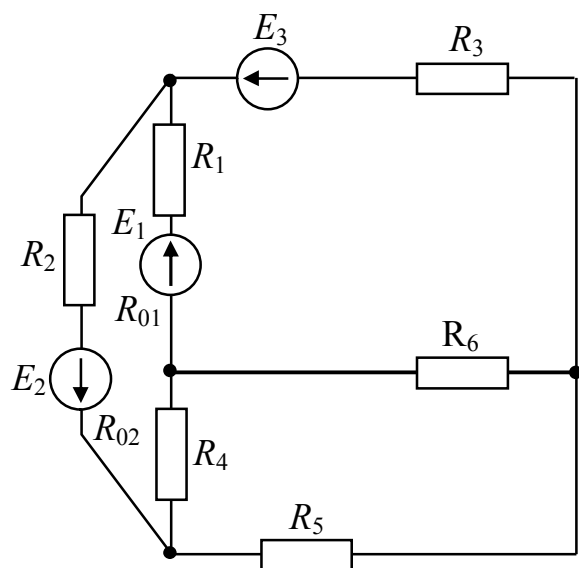
Вариант 32



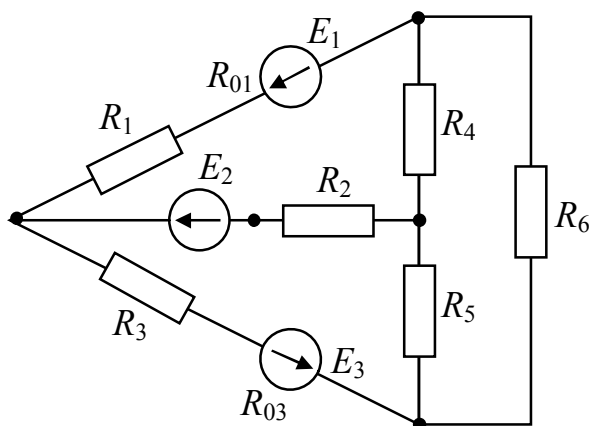
Вариант 33



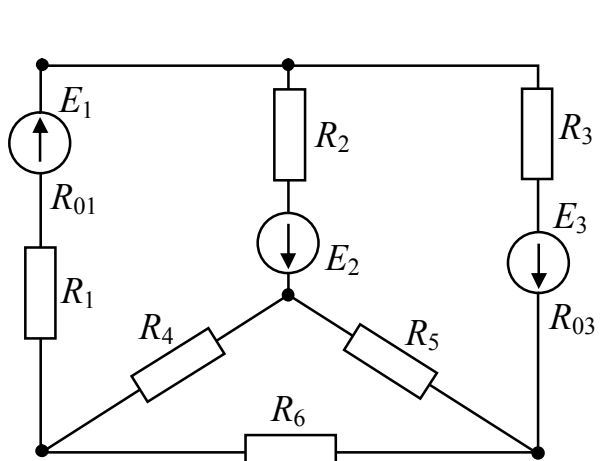
Вариант 34



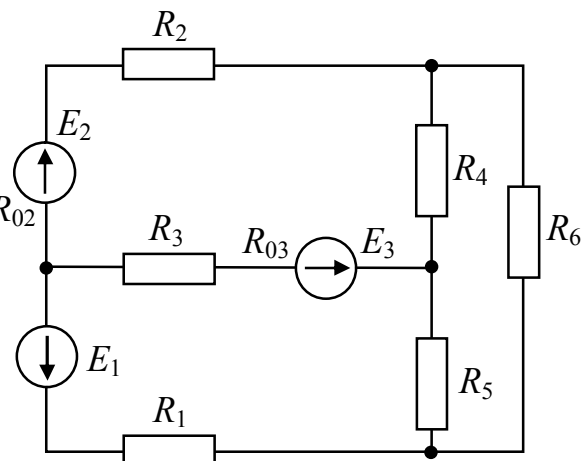
Вариант 35



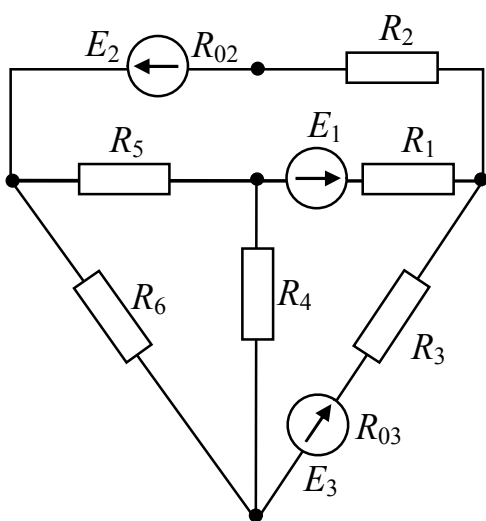
Вариант 36



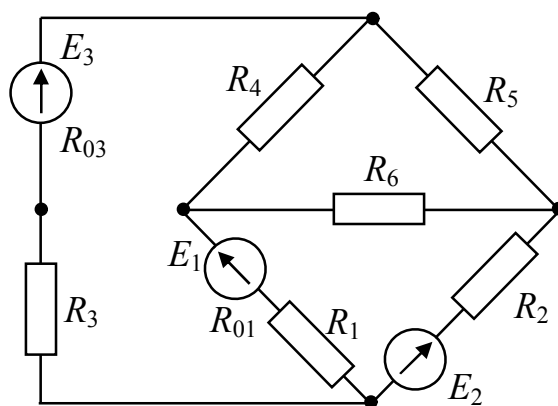
Вариант 37



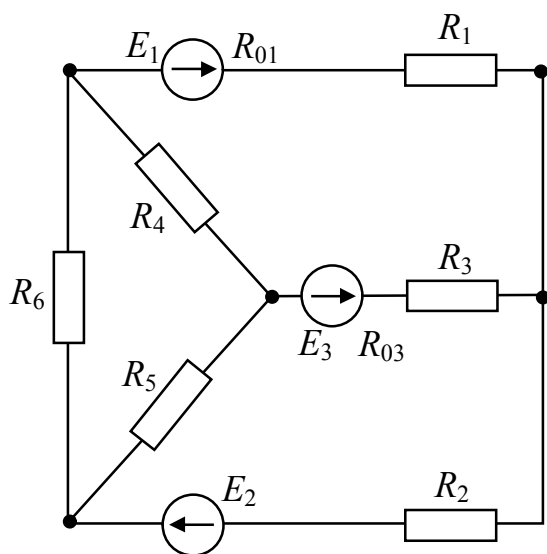
Вариант 38



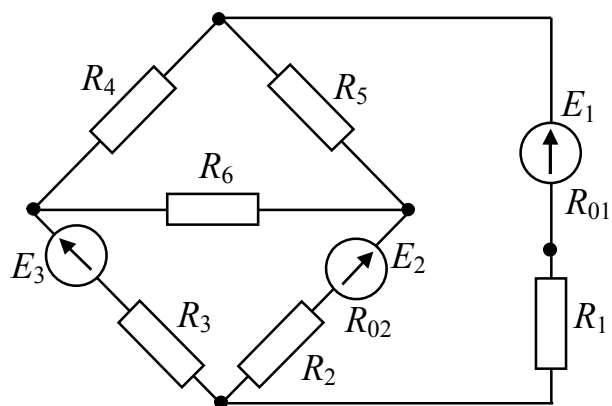
Вариант 39



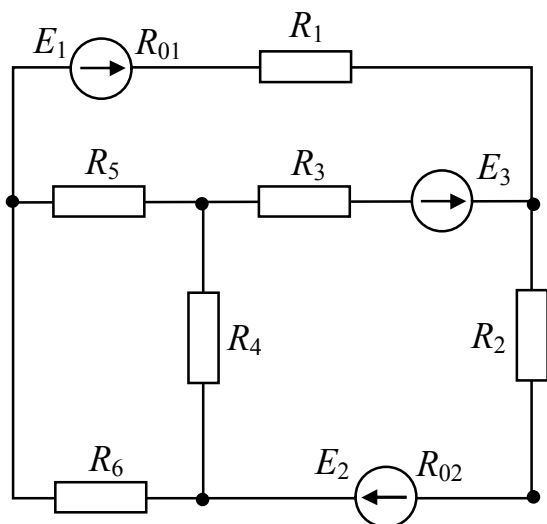
Вариант 40



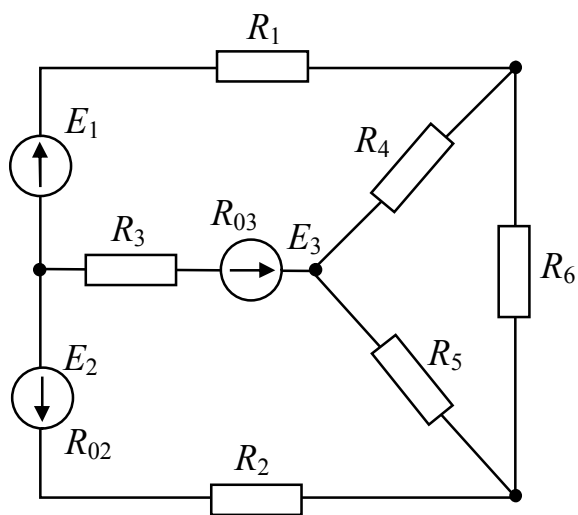
Вариант 41



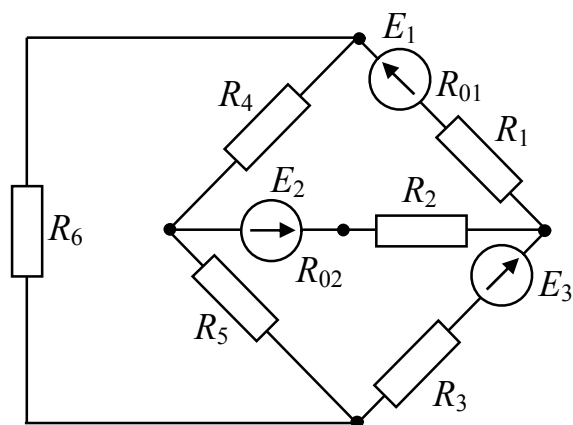
Вариант 42



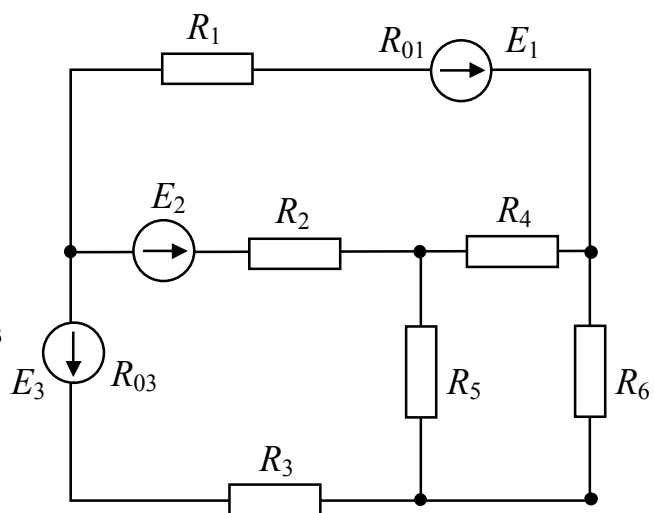
Вариант 43



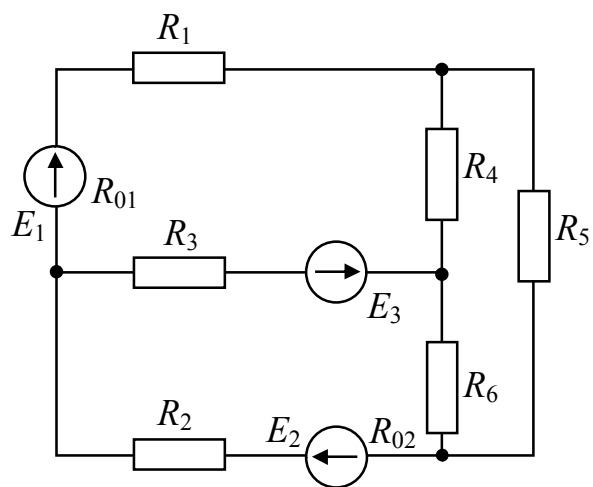
Вариант 44



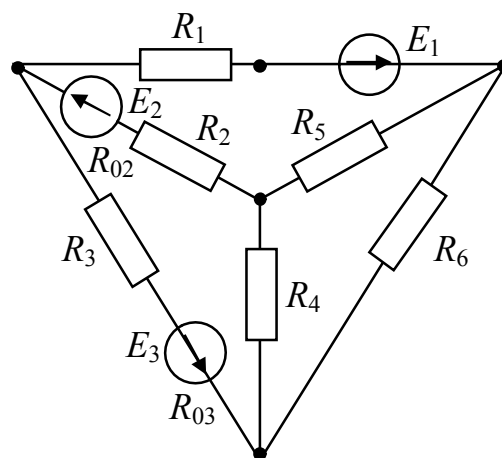
Вариант 45



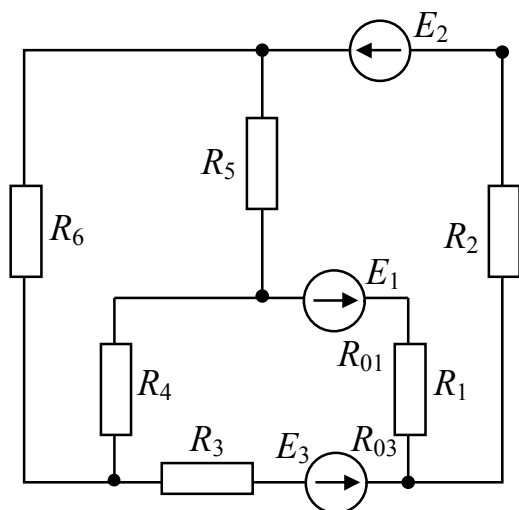
Вариант 46



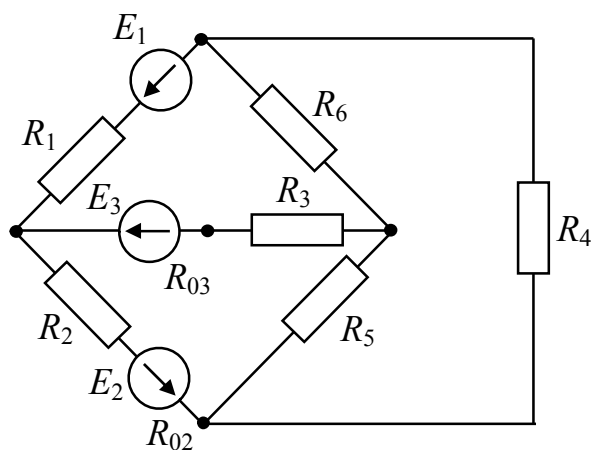
Вариант 47



Вариант 48



Вариант 49



Вариант 50

Таблица 1

Вариант	$E_1, \text{В}$	$E_2, \text{В}$	$E_3, \text{В}$	$R_{01}, \text{Ом}$	$R_{02}, \text{Ом}$	$R_{03}, \text{Ом}$	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$R_3, \text{Ом}$	$R_4, \text{Ом}$	$R_5, \text{Ом}$	$R_6, \text{Ом}$
1	55	18	4	0,8	—	0,8	8	4	3	2	4	4
2	36	10	25	—	0,4	0,5	4	8	3	1	2	7
3	16	5	32	—	0,6	0,8	9	3	2	4	1	5
4	14	25	28	0,9	1,2	—	5	2	8	2	2	6
5	20	22	9	0,1	—	1,1	1	2	6	3	8	4
6	5	16	30	0,4	—	0,7	6	4	3	2	5	3
7	10	6	24	0,8	0,3	—	3,5	5	6	6	3	1
8	6	20	4	—	0,8	1,2	4	6	4	4	3	3
9	21	4	10	—	0,2	0,6	5	7	2	8	1	1
10	4	9	18	0,8	—	0,7	2,7	10	4	8	10	2
11	4	24	6	0,9	—	0,5	9	8	1	6	10	4
12	16	8	9	0,2	0,6	—	2,5	6	6	5	10	5
13	48	12	6	0,8	1,4	—	4,2	4	2	12	6	2
14	12	36	12	—	0,4	1,2	3,5	5	1	5	6	9
15	12	6	40	1,2	0,6	—	2	3	8	5	7	8
16	8	6	36	1,3	—	1,2	3	2	1	6	8	6
17	72	12	4	0,7	1,5	—	6	1	10	4	12	4
18	12	48	6	—	0,4	0,4	2,5	1	4	15	2	2
19	12	30	9	0,5	—	0,5	3,5	2	3	3	1	3
20	9	6	27	—	1	0,8	4	2	3	13	4,5	8
21	15	63	6	1	—	1,2	5	3	1	2	12	3
22	54	27	3	1,2	0,9	—	8	3	1	4	2	2

Окончание табл. 1

Вариант	E ₁ , В	E ₂ , В	E ₃ , В	R ₀₁ , Ом	R ₀₂ , Ом	R ₀₃ , Ом	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R ₃ , Ом	R ₄ , Ом	R ₅ , Ом	R ₆ , Ом
23	36	9	24	—	0,8	0,8	3	4	2	1	5	1
24	3	66	9	—	0,7	1,2	1	4	2	2	7	3
25	12	30	25	1	0,4	—	1	5	1	1	6	4
26	30	16	10	0,6	0,8	—	2	5	3	1	8	5
27	10	32	10	0,6	—	1	1,5	6	1	7	1	5
28	5	10	36	0,3	—	0,8	1,2	6	3	2	2	2
29	40	25	8	—	0,2	0,2	3	3	2	4	3	2
30	8	40	10	0,8	1	—	5	3	3	3	2	1
31	22	24	10	0,2	—	1,2	2	1	8	4	10	6
32	55	18	4	0,8	—	0,8	8	4	3	2	4	4
33	36	10	25	—	0,4	0,5	4	8	3	1	2	7
34	16	5	32	—	0,6	0,8	9	3	2	4	1	5
35	14	25	28	0,9	1,2	—	5	2	8	2	2	6
36	5	16	30	0,4	—	0,7	6	4	3	2	5	3
37	10	6	24	0,8	0,3	—	3,5	5	6	6	3	1
38	6	20	4	—	0,8	1,2	4	6	4	4	3	3
39	21	4	10	—	0,2	0,6	5	7	2	8	1	1
40	4	9	18	0,8	—	0,7	2,7	10	4	8	10	2
41	4	24	6	0,9	—	0,5	9	8	1	6	10	4
42	16	8	9	0,2	0,6	—	2,5	6	6	5	10	5
43	48	12	6	0,8	1,4	—	4,2	4	2	12	6	2
44	12	36	12	—	0,4	1,2	3,5	5	1	5	6	9
45	12	6	40	1,2	0,6	—	2	3	8	5	7	8
46	8	6	36	1,3	—	1,2	3	2	1	6	8	6
47	72	12	4	0,7	1,5	—	6	1	10	4	12	4
48	12	48	6	—	0,4	0,4	2,5	1	4	15	2	2
49	12	30	9	0,5	—	0,5	3,5	2	3	3	1	3
50	9	6	27	—	1	0,8	3	4	8	13	2	4,5

2. ОДНОФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

2.1. Основные понятия о переменном токе

Переменным называется электрический ток, который периодически изменяется во времени как по величине, так и по направлению. В электрических цепях используется синусоидальный переменный ток, который возникает в цепи под действием синусоидальной ЭДС (рис. 15).

Синусоидальные ЭДС, ток и напряжение характеризуются мгновенными и действующими значениями.

Мгновенное значение – это значение синусоидальной величины в любой момент времени. Мгновенные значения e , i , и определяются по выражениям:

$$\left. \begin{aligned} e &= E_m \sin \omega t; \\ i &= I_m \sin \omega t; \end{aligned} \right\} \quad (57)$$

где E_m , I_m , U_m – амплитудные (максимальные) значения соответственно ЭДС, тока и напряжения; ω – круговая (циклическая) частота; ωt – угол или фаза (в системе СИ измеряется в радианах – величина безразмерная).

$$\omega = 2\pi f, \quad (58)$$

где f – линейная частота изменения синусоидальной величины (число периодов в единицу времени). Промышленная частота в России равна 50 Гц.

$$f = \frac{1}{T}, \quad (59)$$

где T – период (время полного цикла) изменения синусоидальной величины.

Таким образом, в отличие от цепей постоянного тока, в цепях переменного тока ЭДС, ток и напряжение характеризуются не только величиной (амплитудой), но и *фазой*.

На практике для количественной оценки действия переменного тока пользуются действующим значением.

Действующим называется значение такого переменного тока, который производит тот же тепловой эффект, что и равный ему по величине постоянный ток. Действующие значения ЭДС, напряжения и тока

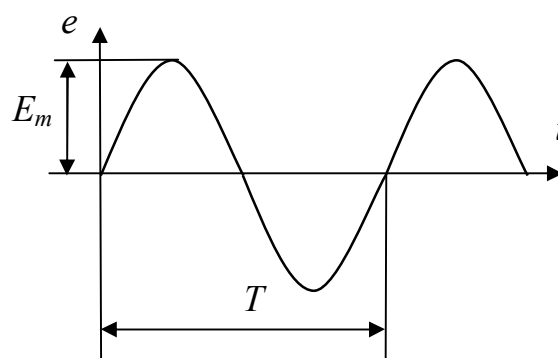


Рис. 15. Временная диаграмма

являются среднеквадратичными значениями их мгновенных значений и обозначаются E , U , I .

Действующие значения синусоидальных величин меньше амплитудных значений этих величин в $\sqrt{2}$ раз:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}; U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}; E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}. \quad (60)$$

Номинальные величины тока, напряжения и ЭДС источников и потребителей переменного тока являются действующими значениями этих величин.

Амперметры и вольтметры переменного тока измеряют преимущественно действующие значения тока и напряжения.

2.2. Элементы и параметры электрических цепей переменного тока

При анализе электрических цепей переменного тока все электротехнические устройства можно рассматривать состоящими из резистивного (активного), индуктивного и емкостного элементов. Чтобы характеризовать свойства элементов электрических цепей, вводят понятие параметров элементов.

В общем случае цепь переменного тока характеризуется тремя параметрами: активным сопротивлением R , индуктивностью L и емкостью C .

При анализе работы электрических цепей переменного тока исходят из того, что для мгновенных значений переменного тока справедливы все правила и законы цепей постоянного тока.

2.2.1. Цепь переменного тока с активным сопротивлением

На зажимах цепи переменного тока (рис. 16) действует напряжение $u = U_m \sin \omega t$.

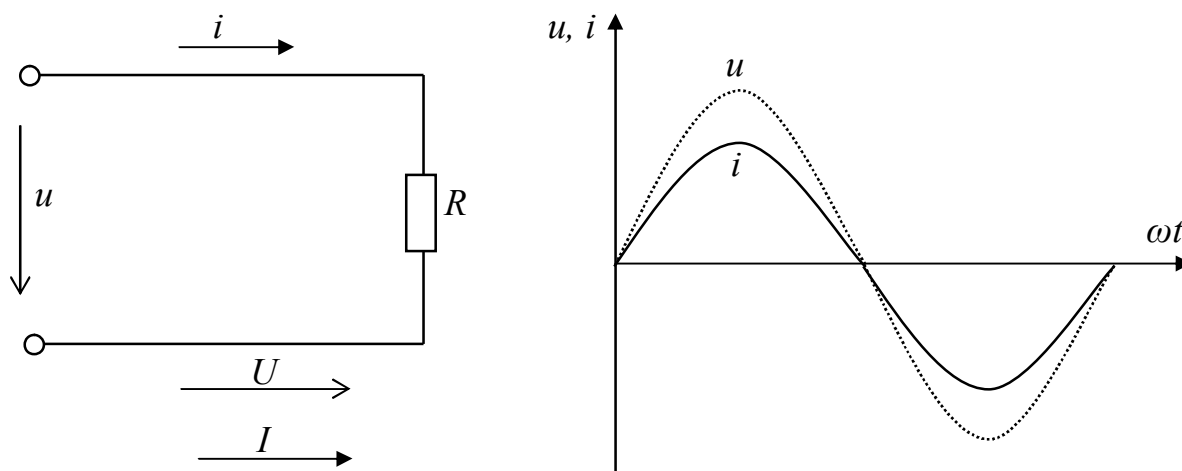


Рис. 16. Электрическая схема, графики изменения напряжения, тока и векторная диаграмма для цепи с активным сопротивлением

Так как цепь обладает только активным сопротивлением, то согласно закону Ома для участка цепи

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m \sin \omega t}{R} = I_m \sin \omega t, \quad (61)$$

т.е.

$$i = I_m \sin \omega t. \quad (62)$$

Из выражений (61) и (62) видно, что в цепи переменного тока с активным сопротивлением ток и напряжение совпадают по фазе.

Для приведенной выше цепи

$$I = \frac{U}{R}. \quad (63)$$

Мгновенная мощность цепи

$$p = u \cdot i = U_m I_m \sin^2 \omega t. \quad (64)$$

Как видно из рис. 17, мощность в цепи с активным сопротивлением изменяется по величине, но не изменяется по направлению.

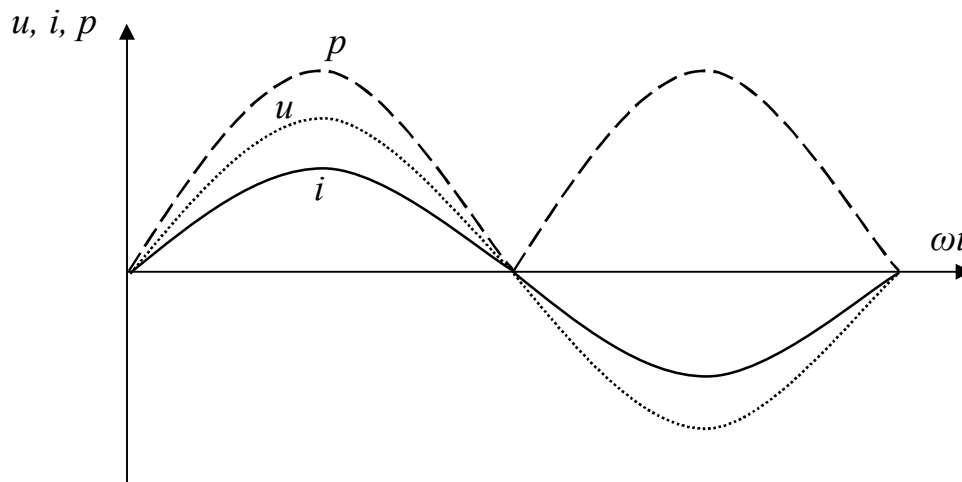


Рис. 17. Графики изменения мгновенных значений тока,

напряжения и мощности в цепи с активным сопротивлением

То есть электрическая мощность каждые полпериода забирается в виде импульса из сети и превращается в другие виды мощности. Такая мощность называется *активной*.

Величина активной мощности определяется по формуле

$$P = I^2 R. \quad (65)$$

Активная мощность измеряется в ваттах (Вт).

2.2.2. Цепь переменного тока с индуктивным элементом

Рассмотрим цепь переменного тока с идеальной катушкой с индуктивностью L (рис. 18). Активное сопротивление катушки равно нулю ($R=0$).

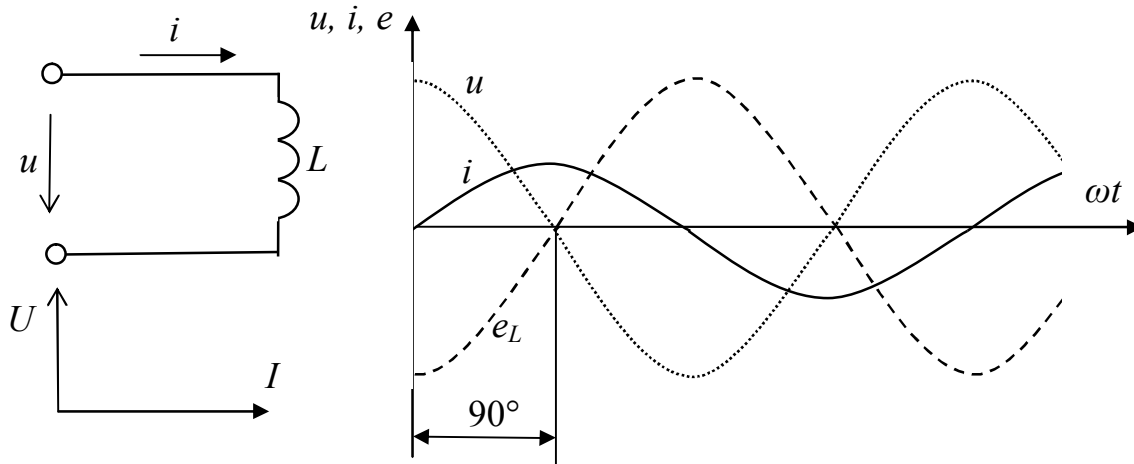


Рис. 18. Электрическая схема, графики изменения напряжения, тока, ЭДС самоиндукции и векторная диаграмма для цепи с индуктивным элементом

Под действием синусоидального напряжения в цепи с индуктивным элементом протекает синусоидальный ток

$$i = I_m \sin \omega t. \quad (66)$$

В результате этого вокруг катушки возникает переменное магнитное поле и в катушке наводится ЭДС самоиндукции. При $R=0$ напряжение источника U целиком идет на уравнивание этой ЭДС:

$$u = -e_L. \quad (67)$$

Так как

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = -L \frac{d(I_m \sin \omega t)}{dt} = -I_m L \omega \cos \omega t, \quad (68)$$

то

$$u = I_m L \omega \cos \omega t = U_m \cos \omega t = U_m \sin(\omega t + 90^\circ). \quad (69)$$

Из выражений (68) и (69) видно, что в цепи с индуктивным элементом ток отстает от напряжения по фазе на угол 90° ($\frac{\pi}{2}$), а согласно выражению (67) ЭДС находится в противофазе с приложенным напряжением (см. рис. 18).

Катушка в цепи переменного тока оказывает этому току сопротивление, которое называется индуктивным и обозначается X_L .

$$X_L = \omega L = 2\pi f L. \quad (70)$$

Это сопротивление имеет размерность Ом.

Математическое выражение закона Ома для этой цепи

$$I = \frac{U}{X_L}. \quad (71)$$

Мгновенная мощность для цепи с индуктивным сопротивлением

$$p = u \cdot i = U_m \sin(\omega t + 90^\circ) \cdot I_m \sin \omega t = \frac{1}{2} \cdot U_m \cdot I_m \sin 2\omega t. \quad (72)$$

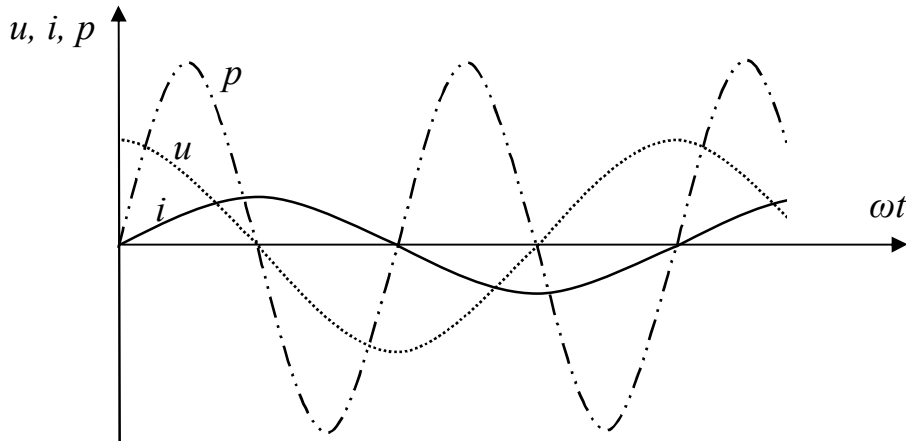


Рис. 19. Графики изменения напряжения, тока и мощности в цепи с индуктивным сопротивлением

Из рис. 19 видно, что при одинаковых знаках напряжения и тока мгновенная мощность положительна, а при разных знаках – отрицательна. Это означает, что мощность в первую четверть периода забирается из сети и запасается в магнитном поле катушки, а в следующую четверть периода возвращается в сеть, т.е. происходит перекачивание энергии от источника к потребителю и обратно. Для количественной характеристики интенсивности обмена энергией между источником и катушкой служит реактивная мощность

$$Q_L = I^2 X_L. \quad (73)$$

Размерностью этой мощности является вольт-ампер реактивный (ВАр).

2.2.3. Цепь переменного тока с емкостным элементом

На рис. 20 приведена схема цепи переменного тока с емкостным элементом (конденсатором).

Под действием синусоидального напряжения

$$u = U_m \sin \omega t \quad (74)$$

в цепи с емкостным элементом протекает ток

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} = C \frac{d(U_m \sin \omega t)}{dt} = U_m C \omega \cos \omega t = U_m C \omega \sin(\omega t + 90^\circ), \quad (75)$$

или

$$i = U_m C \omega \sin(\omega t + 90^\circ) = I_m \sin(\omega t + 90^\circ), \quad (76)$$

где C – емкость; q – заряд на электродах емкостного элемента.

Из выражений (74) и (76) видно, что в цепи с емкостным элементом ток опережает по фазе напряжение на угол 90° ($\frac{\pi}{2}$) (см. рис. 20).

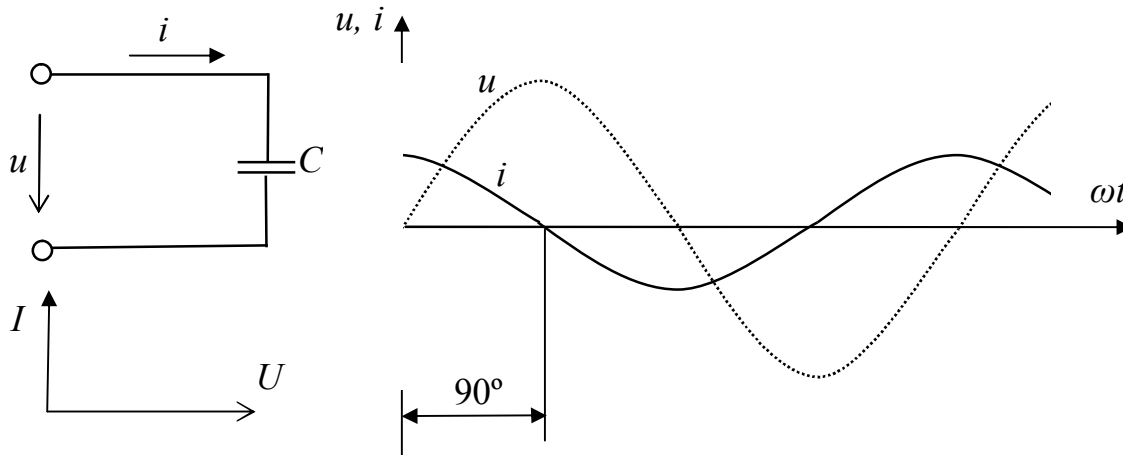


Рис. 20. Электрическая схема, графики изменения напряжения, тока и векторная диаграмма для цепи с емкостным элементом

В цепи переменного тока емкостный элемент обладает сопротивлением, которое называется емкостным и обозначается X_C .

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}. \quad (77)$$

Это сопротивление имеет размерность Ом.

Математическое выражение закона Ома для этой цепи

$$I = \frac{U}{X_C}. \quad (78)$$

Мгновенная мощность в цепи с емкостным сопротивлением будет в противофазе с мгновенной мощностью в цепи с индуктивным элементом

$$p = -u \cdot i = -U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin(\omega t + 90^\circ) = -\frac{1}{2} U_m I_m \sin 2\omega t. \quad (79)$$

Анализ приведенных формул показывает, что в цепи с емкостью (как и в цепи с индуктивностью) мощность в первую четверть периода

забирается из сети и запасается в электрическом поле конденсатора, а в следующую четверть периода возвращается в сеть. Эта мощность называется реактивной и определяется выражением

$$Q_C = I^2 X_C. \quad (80)$$

2.3. Анализ неразветвленной цепи переменного тока

Цепь с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью представляет собой общий случай последовательного соединения активных и реактивных сопротивлений (рис. 21).

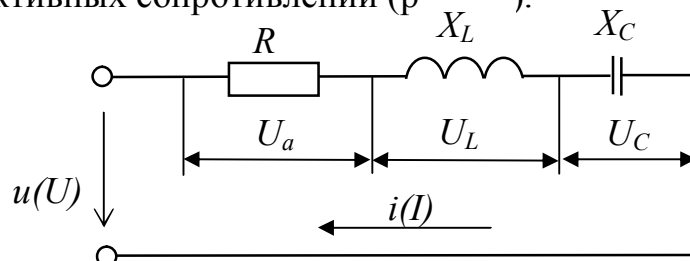


Рис. 21. Последовательное соединение активного, индуктивного и емкостного сопротивлений

При прохождении тока в цепи на каждом элементе возникает падение напряжения:

$$\left. \begin{aligned} U_a &= I \cdot R; \\ U_L &= I \cdot X_L; \\ U_C &= I \cdot X_C. \end{aligned} \right\} \quad (81)$$

Для каждого элемента цепи угол сдвига по фазе между током и напряжением имеет свое значение. Вектор приложенного к схеме напряжения U определится как сумма векторов напряжений на отдельных элементах схемы. Для рассматриваемой одноконтурной схемы в соответствии со вторым законом Кирхгофа справедливо уравнение

$$\bar{U} = \bar{U}_a + \bar{U}_L + \bar{U}_C. \quad (82)$$

Для анализа работы данной цепи построим векторную диаграмму (рис. 22). Перед построением выбирается масштаб для тока и напряжения. Построение векторной диаграммы начинают с вектора той величины, которая является общей для всех элементов цепи. В данном случае при последовательном соединении общей величиной для всех элементов цепи является ток. Поэтому первым проводим вектор тока. Вектор напряжения на активном сопротивлении совпадает по фазе

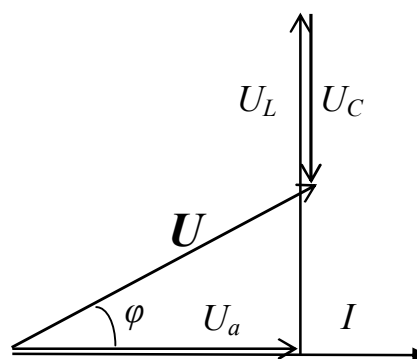


Рис. 22. Векторная диаграмма для схемы, состоящей из

последовательно соединенных активного,

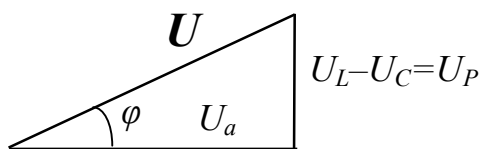


Рис. 23. Треугольник напряжений

Знак перед углом сдвига фаз φ зависит от режима цепи. Если в рассматриваемой цепи преобладает индуктивное сопротивление, то

$$U_L > U_C. \quad (83)$$

В этом случае нагрузка имеет активно-индуктивный характер, а напряжение U опережает по фазе ток I (угол φ положительный).

Если в цепи преобладает емкостное сопротивление, то

$$U_L < U_C. \quad (84)$$

В этом случае нагрузка имеет активно-емкостный характер, а напряжение U отстает по фазе от тока I (угол φ отрицательный).

Выделим из векторной диаграммы треугольник напряжений (рис. 23), из которого следует:

$$\begin{aligned} U &= \sqrt{U_a^2 + (U_L - U_C)^2} = \sqrt{I^2 R^2 + (I X_L - I X_C)^2} = \\ &= I \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}. \end{aligned} \quad (85)$$

Закон Ома для неразветвленной цепи запишется в виде

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{U}{Z}, \quad (86)$$

где Z – полное сопротивление неразветвленной цепи,

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}. \quad (87)$$

Если стороны треугольника напряжений разделить на силу тока, получится треугольник сопротивлений; если стороны треугольника напряжений умножить на силу тока, получится треугольник мощностей (рис. 24).

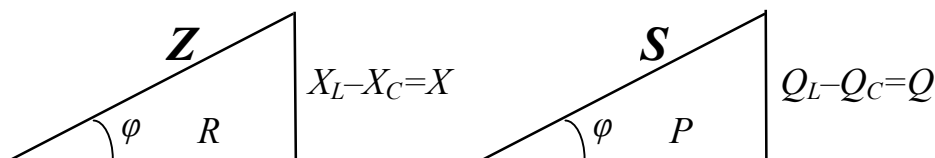


Рис. 24. Треугольники сопротивлений и мощностей

Из приведенных треугольников можно записать уравнения, которые широко используются при анализе электрических цепей.

Из треугольника сопротивлений:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}; \quad (88)$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}; \sin \varphi = \frac{X}{Z}. \quad (89)$$

Из треугольника мощностей:

$$S = IU, \quad (90)$$

или

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2}, \quad (91)$$

где S – полная мощность; P – активная мощность; Q – реактивная мощность.

Размерность полной мощности – вольт-ампер (ВА); размерность активной мощности – ватт (Вт); размерность реактивной мощности – вольт-ампер реактивный (ВАр).

Величина $\cos \varphi$ называется коэффициентом мощности цепи.

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}. \quad (92)$$

$$P = S \cos \varphi = IU \cos \varphi. \quad (93)$$

$$\sin \varphi = \frac{Q}{S}. \quad (94)$$

$$Q = S \sin \varphi = IU \sin \varphi. \quad (95)$$

2.4. Резонанс напряжений

В замкнутом контуре электрической цепи (см. рис. 21), содержащей активное сопротивление R , индуктивность L и емкость C , при условии равенства реактивных сопротивлений

$$X_L = X_C \quad (96)$$

возникает резонанс напряжений.

Выразим X_L и X_C через частоту ω и подставим в равенство (96).

$$\omega_{рез} L = \frac{1}{\omega_{рез} C}, \quad (97)$$

откуда

$$\omega_{рез} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0, \quad (98)$$

где $\omega_{рез}$ – частота питающего напряжения; ω_0 – частота собственных колебаний LC -контура.

Резонанс напряжений возникает в том случае, когда частота питающего напряжения равна частоте собственных колебаний LC -контура.

Следовательно, добиться резонанса напряжений можно изменением частоты $\omega_{рез}$ или параметров контура L и C .

При резонансе напряжений

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + 0}} = \frac{U}{R}, \quad (99)$$

т.е. полное сопротивление цепи становится минимальным и равным только активному сопротивлению. Следовательно, ток при резонансе напряжений максимальный.

При резонансе напряжений (рис. 25)

$$U_L = U_C. \quad (100)$$

Если при этом

$$X_L = X_C > R, \quad (101)$$

то напряжение на участке с индуктивным сопротивлением и равное ему напряжение на участке с емкостным сопротивлением будут больше питающего напряжения U .

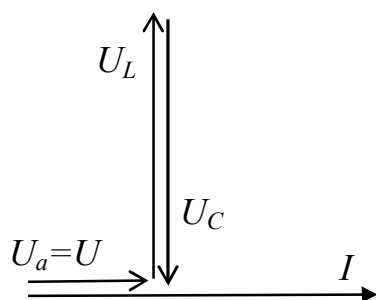


Рис. 25. Векторная диаграмма при резонансе напряжений

Из векторной диаграммы (см. рис. 25) видно, что при резонансе напряжение U , приложенное к цепи, оказывается равным напряжению на активном сопротивлении ($U=U_a$) и совпадает по фазе с током I , т.е. угол сдвига фаз между I и U равен нулю ($\varphi=0$).

2.5. Пример расчета неразветвленной цепи переменного тока

Имеется неразветвленная (одноконтурная) цепь переменного тока (рис. 26).

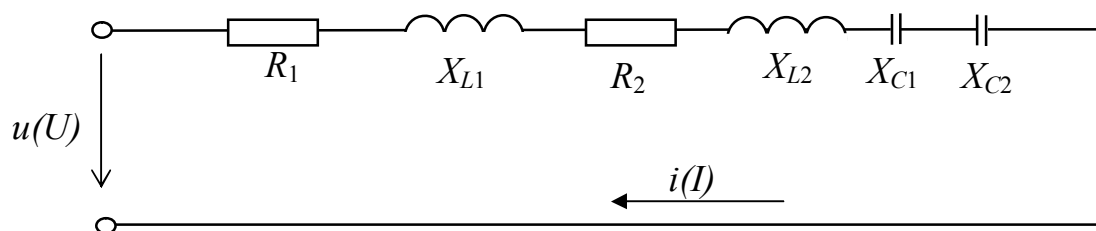


Рис. 26. Неразветвленная цепь переменного тока

Дано: $R_1=2$ Ом; $R_2=2$ Ом; $X_{L1}=4$ Ом; $X_{L2}=5$ Ом; $X_{C1}=4$ Ом; $X_{C2}=2$ Ом; $U=220$ В.

Определить: Z (полное сопротивление цепи), $\cos \varphi$, $\sin \varphi$, S (полную мощность), P (активную мощность), Q (реактивную мощность), I (ток цепи). Построить в масштабе векторную диаграмму.

Решение.

1. Определим полное сопротивление цепи по формуле

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2},$$

где $R=R_1+R_2=2+2=4$ Ом – арифметическая сумма всех активных сопротивлений; $X_L=X_{L1}+X_{L2}=4+5=9$ Ом; $X_C=X_{C1}+X_{C2}=4+2=6$ Ом – соответственно арифметические суммы однотипных реактивных (индуктивных и емкостных) сопротивлений.

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{4^2 + (9 - 6)^2} = 5 \text{ Ом.}$$

2. Определим ток по закону Ома для цепи переменного тока:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{5} = 44 \text{ А.}$$

3. Из треугольника сопротивлений определим:

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{4}{5} = 0,8; \sin \varphi = \frac{X_L - X_C}{Z} = \frac{9 - 6}{5} = \frac{3}{5} = 0,6.$$

По значениям тригонометрических функций определим величину угла сдвига фаз:

$$\varphi = 36^\circ 50'.$$

4. Полная мощность $S=U \cdot I=220 \cdot 44=9680$ ВА=9,680 кВА.

5. Активная мощность $P=S \cdot \cos \varphi=9680 \cdot 0,8=7744$ Вт=7,744 кВт.

6. Реактивная мощность $Q=S \cdot \sin \varphi=9680 \cdot 0,6=5808$ ВАр=5,808 кВАр.

При построении векторной диаграммы тока и напряжений следует исходить из следующих условий:

1) через все сопротивления протекает одинаковый ток, так как схема одноконтурная;

2) на каждом сопротивлении создается падение напряжения, величина которого определяется по закону Ома для участка цепи:

–на активном сопротивлении $U_a=I \cdot R$;

–на индуктивном сопротивлении $U_L=I \cdot X_L$;

–на емкостном сопротивлении $U_C=I \cdot X_C$.

Построение векторной диаграммы.

1. Зная величину тока ($I=44$ А), определим падения напряжения на всех сопротивлениях:

$$U_{L1} = I \cdot X_{L1} = 44 \cdot 4 = 176 \text{ В}; \quad U_{a1} = I \cdot R_1 = 44 \cdot 2 = 88 \text{ В};$$

$$U_{L2} = I \cdot X_{L2} = 44 \cdot 5 = 220 \text{ В}; \quad U_{a2} = I \cdot R_2 = 44 \cdot 2 = 88 \text{ В};$$

$$U_{C1} = I \cdot X_{C1} = 44 \cdot 4 = 176 \text{ В}; \quad U_{C2} = I \cdot X_{C2} = 44 \cdot 2 = 88 \text{ В}.$$

2. Исходя из размеров бумаги (миллиметровка или тетрадный лист в клеточку), задаем масштаб по току и напряжению. Для рассматриваемого примера принимаем: масштаб по току $m_I = 10 \text{ А/см}$, масштаб по напряжению $m_U = 44 \text{ В/см}$.

Длина вектора тока

$$\ell_I = I / m_I = \frac{44 \text{ А}}{10 \text{ А/см}} = 4,4 \text{ см}.$$

Длины векторов напряжений:

$$\ell_{UL1} = U_{L1} / m_U = \frac{176 \text{ В}}{44 \text{ В/см}} = 4 \text{ см}; \quad \ell_{Ua1} = U_{a1} / m_U = \frac{88 \text{ В}}{44 \text{ В/см}} = 2 \text{ см};$$

$$\ell_{UL2} = U_{L2} / m_U = \frac{220 \text{ В}}{44 \text{ В/см}} = 5 \text{ см}; \quad \ell_{Ua2} = U_{a2} / m_U = \frac{88 \text{ В}}{44 \text{ В/см}} = 2 \text{ см};$$

$$\ell_{UC1} = U_{C1} / m_U = \frac{176 \text{ В}}{44 \text{ В/см}} = 4 \text{ см}; \quad \ell_{UC2} = U_{C2} / m_U = \frac{88 \text{ В}}{44 \text{ В/см}} = 2 \text{ см}.$$

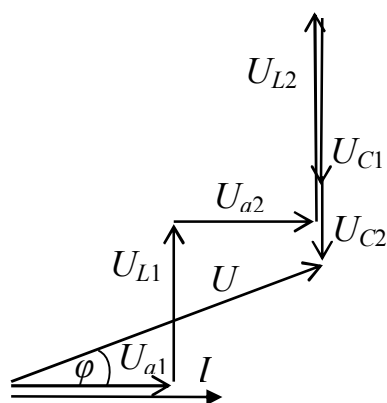


Рис. 27. Векторная диаграмма для неразветвленной цепи

3. Выполняем построение диаграммы в следующей последовательности:

–проводим вектор тока (рис. 27);

–проводим векторы напряжений на каждом сопротивлении с учетом сдвига фаз относительно вектора тока, при этом следует придерживаться последовательности расположения сопротивлений на схеме (см. рис. 26):

$$U_{a1} \rightarrow U_{L1} \rightarrow U_{a2} \rightarrow U_{L2} \rightarrow U_{C1} \rightarrow U_{C2};$$

–вектор напряжения $\bar{U}$ находим сложением векторов, для чего начало принятого за первый вектор $\bar{U}_{a1}$ соединяем с концом последнего вектора $\bar{U}_{C2}$:

$$\bar{U} = \bar{U}_{a1} + \bar{U}_{L1} + \bar{U}_{a2} + \bar{U}_{L2} + \bar{U}_{C1} + \bar{U}_{C2}.$$

Угол φ является углом сдвига фаз между током и общим (приложенным) напряжением.

2.6. Анализ разветвленной цепи переменного тока методом проводимостей

Для расчета разветвленных цепей с большим числом ветвей обычно пользуются методом проводимостей. Проводимость измеряется в сименсах (См). Эта единица измерения является обратной по отношению к ому (Ом).

Токи в параллельных ветвях (рис. 28) определяются по закону Ома:

$$I_1 = \frac{U}{Z_1} = \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + X_{L1}^2}}; \quad (102)$$

$$I_2 = \frac{U}{Z_2} = \frac{U}{\sqrt{R_2^2 + X_{C1}^2}}. \quad (103)$$

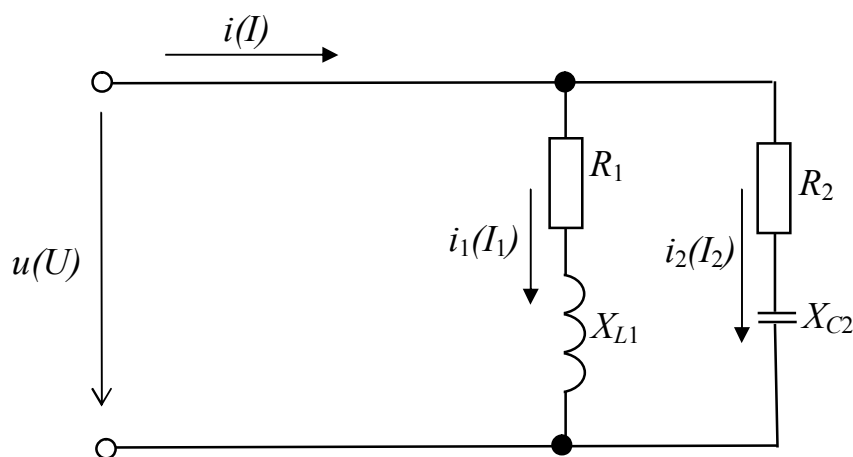


Рис. 28. Электрическая цепь с двумя параллельными ветвями

Вектор тока I_1 первой ветви отстает от вектора напряжения на угол φ_1 , а вектор тока I_2 второй ветви опережает вектор напряжения на угол φ_2 .

Углы сдвига фаз можно определить исходя из соотношений:

$$\cos \varphi_1 = \frac{R_1}{Z_1}; \quad \cos \varphi_2 = \frac{R_2}{Z_2}. \quad (104)$$

Общий ток I (до разветвления) определяется как векторная сумма токов ветвей:

$$\bar{I} = \bar{I}_1 + \bar{I}_2. \quad (105)$$

При расчете цепи методом проводимостей ток каждой ветви условно рассматривается состоящим из двух составляющих: активной и реактивной:

$$\left. \begin{aligned} \bar{I}_1 &= \bar{I}_{a1} + \bar{I}_{p1}; \\ \bar{I}_2 &= \bar{I}_{a2} + \bar{I}_{p2}. \end{aligned} \right\} \quad (106)$$

Активная составляющая тока совпадает по фазе с напряжением, реактивная составляющая тока имеет угол сдвига по фазе 90° по отношению к напряжению.

На рис. 29 каждый вектор тока I_1 , I_2 , I разложен на активную и реактивную составляющие. Из векторной диаграммы

$$\left. \begin{aligned} I_{a1} &= I_1 \cos \varphi_1 = \frac{U}{Z_1} \cdot \frac{R_1}{Z_1} = U \cdot \frac{R_1}{Z_1^2} = U \cdot g_1; \\ I_{a2} &= I_2 \cos \varphi_2 = \frac{U}{Z_2} \cdot \frac{R_2}{Z_2} = U \cdot \frac{R_2}{Z_2^2} = U \cdot g_2, \end{aligned} \right\} \quad (107)$$

где $g_1 = \frac{R_1}{Z_1^2}$ – активная проводимость первой ветви; $g_2 = \frac{R_2}{Z_2^2}$ – активная проводимость второй ветви.

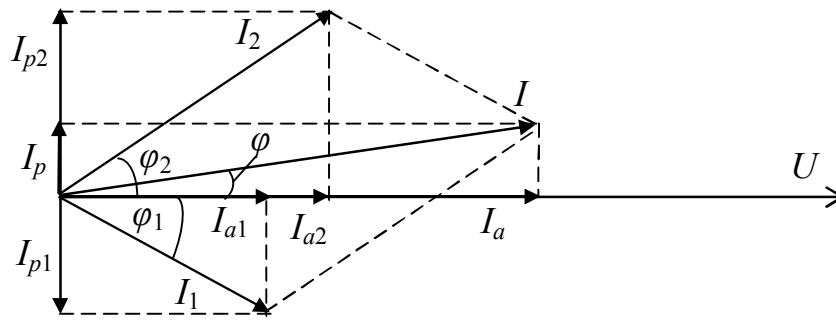


Рис. 29. Векторная диаграмма для электрической цепи с двумя параллельными ветвями

Активная проводимость всей цепи

$$g = g_1 + g_2. \quad (108)$$

Реактивная составляющая тока первой ветви

$$I_{p1} = I_1 \cdot \sin \varphi_1 = \frac{U}{Z_1} \cdot \frac{X_{L1}}{Z_1} = U \cdot \frac{X_{L1}}{Z_1^2} = U \cdot b_{L1}, \quad (109)$$

где $b_{L1} = \frac{X_{L1}}{Z_1^2}$ – реактивная проводимость первой ветви (для рассматриваемой схемы эта реактивная проводимость будет индуктивной).

Реактивная составляющая тока второй ветви определяется аналогичным образом:

$$I_{p2} = I_2 \cdot \sin \varphi_2 = U \cdot b_{C2}, \quad (110)$$

где $b_{C2} = \frac{X_{C2}}{Z_2^2}$ – реактивная проводимость второй ветви (для рассматриваемой схемы эта реактивная проводимость будет емкостной).

Эквивалентную схему, полученную в результате данного анализа, можно представить состоящей из трех параллельных ветвей (рис. 30).

Параметры элементов эквивалентной схемы определяются из следующих соотношений:

$$\left. \begin{aligned} R_9 &= \frac{1}{g_1 + g_2}; \\ X_{L_9} &= \frac{1}{b_{L1}}; \\ X_{C_9} &= \frac{1}{b_{C2}}. \end{aligned} \right\} \quad (111)$$

Реактивная составляющая общего тока

$$I_p = I_{p1} + (-I_{p2}) = U \cdot b_{L1} + (-U \cdot b_{C2}) = U \cdot [(b_{L1} + (-b_{C2}))]. \quad (112)$$

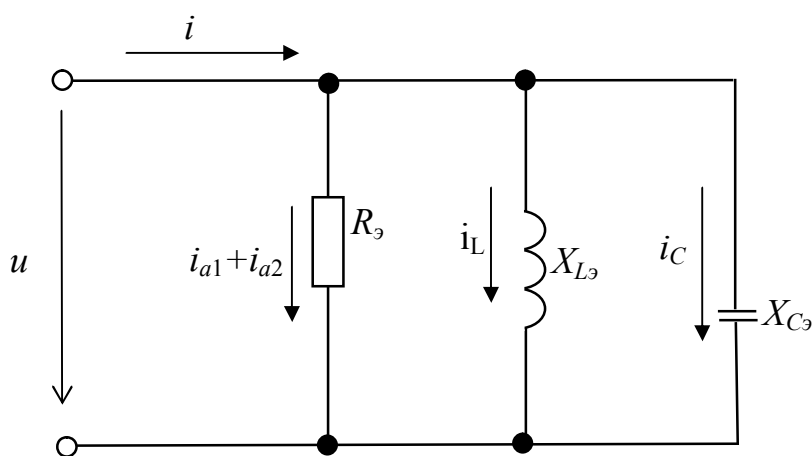


Рис. 30. Эквивалентная схема разветвленной цепи

В общем случае активная и реактивная проводимости всей цепи определяются по формулам:

$$g = \sum g_n; b = \sum b_n, \quad (113)$$

где n – количество параллельных ветвей в цепи.

Следует иметь в виду, что при вычислении реактивной проводимости *емкостная проводимость по отношению к индуктивной берется с противоположным знаком.*

Из векторной диаграммы ток в неразветвленной части цепи

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{(U \cdot g)^2 + (U \cdot b)^2} = U \sqrt{g^2 + b^2} = U \cdot y, \quad (114)$$

где $y = \sqrt{g^2 + b^2}$ – полная проводимость всей цепи.

Таким образом, в общем случае ток в неразветвленной части цепи

$$I = U \sqrt{(\sum g)^2 + (\sum b)^2}. \quad (115)$$

2.7. Резонанс токов

При параллельном соединении катушки индуктивности и конденсатора, когда индуктивная проводимость равна емкостной

$$b_L = b_C, \quad (116)$$

возникает резонанс токов. В приведенной схеме (рис. 31) параллельно резистору включены идеальная катушка и конденсатор.

Выразим индуктивную и емкостную проводимости через частоту ω :

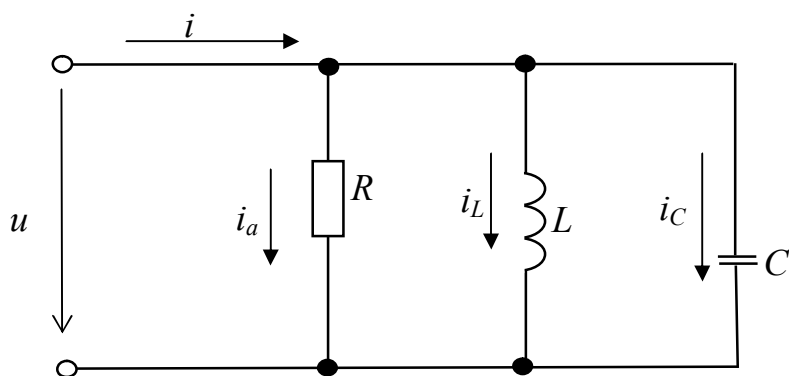
$$b_L = \frac{1}{\omega_{рез} L}; b_C = \omega_{рез} C. \quad (117)$$

Произведем подстановку выражений (117) в уравнение (116):

$$\omega_{рез}C = \frac{1}{\omega_{рез}L}. \quad (118)$$

Из уравнения (118) определим резонансную частоту

$$\omega_{рез} = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (119)$$



**Рис. 31. Электрическая схема разветвленной цепи,
иллюстрирующая резонанс токов**

Резонанс токов, так же как и резонанс напряжений, можно получить изменением параметров L и C или изменением частоты питающего напряжения ω .

При заданном напряжении источника энергии ток в цепи пропорционален проводимости:

$$I = U \cdot y = U \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2}. \quad (120)$$

При резонансе токов с учетом равенства (116) уравнение (120) примет вид

$$I = U \cdot g. \quad (121)$$

Резонанс токов характеризуется наименьшей величиной тока в неразветвленной части цепи, равной току в ветви с активным сопротивлением, и

При резонансе токи в параллельных ветвях током и напряжение I_L, I_C , равные между собой по величине, но

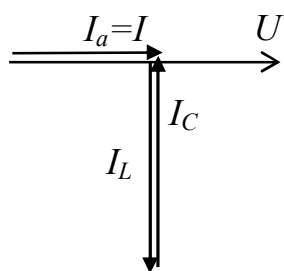


Рис. 32.

Векторная

диаграмма для

противоположные по фазе, могут быть значительно больше общего тока I , равного активному току I_a , если $b_L = b_C > g$. Это объясняется тем, что реактивные составляющие токов катушки индуктивности и конденсатора взаимно

Использование резонанса токов позволяет повысить коэффициент мощности электрических установок промышленных предприятий и тем самым уменьшить реактивную мощность и связанные с ней потери.

Резонанс токов широко используется в различных радиотехнических цепях: в устройствах автоматики, телемеханики и связи.

2.8. Пример расчета разветвленной цепи переменного тока

Имеется разветвленная электрическая цепь (рис. 33).

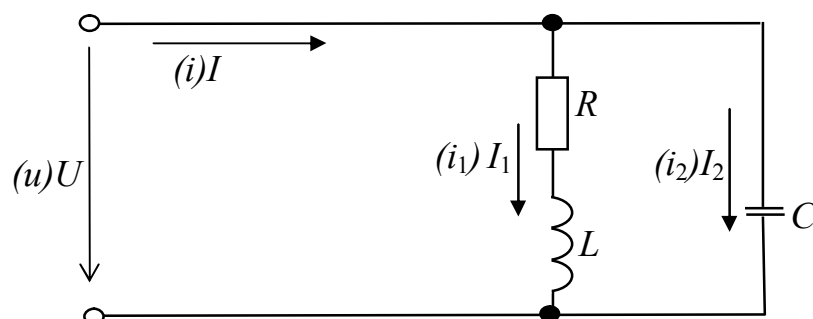


Рис. 33. Схема разветвленной электрической цепи

Дано: $U=127$ В; $f=50$ Гц; $R=10$ Ом; $L=63,7$ мГн; $C=212$ мкФ.

Определить: I_1 , I_2 , I (токи всех участков цепи); φ_1 , φ_2 , φ (углы сдвига фаз токов относительно напряжения); S (полную мощность); P (активную мощность); Q (реактивную мощность); построить векторную диаграмму.

Решение.

1. Реактивные сопротивления:

$$X_L = \omega L = 314 \cdot 63,7 \cdot 10^{-3} = 20 \text{ Ом}; \quad X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{10^6}{314 \cdot 212} = 15 \text{ Ом}.$$

2. Полное сопротивление первой ветви

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_L^2} = \sqrt{10^2 + 20^2} = 22,4 \text{ Ом}.$$

3. Токи в ветвях:

$$I_1 = \frac{U}{Z_1} = \frac{127}{22,4} = 5,67 \text{ А}; \quad I_2 = \frac{U}{X_C} = \frac{127}{15} = 8,47 \text{ А}.$$

4. Активная проводимость первой ветви

$$g_1 = \frac{R}{Z_1^2} = \frac{10}{22,4^2} = 0,02 \text{ См}.$$

5. Индуктивная проводимость первой ветви

$$b_{L1} = \frac{X_L}{Z_1^2} = \frac{20}{22,4^2} = 0,04 \text{ См}.$$

6. Емкостная проводимость второй ветви

$$b_{C2} = \frac{1}{X_C} = \frac{1}{15} = 0,067 \text{ См}.$$

7. Полная проводимость цепи

$$y = \sqrt{g_1^2 + (b_{L1} - b_{C2})^2} = \sqrt{0,02^2 + (0,04 - 0,067)^2} = 3,36 \cdot 10^{-2} \text{ См}.$$

8. Ток в неразветвленной части цепи

$$I=U \cdot y=127 \cdot 3,36 \cdot 10^{-2}=4,27 \text{ А.}$$

9. Углы сдвига фаз:

$$\varphi_1 = \operatorname{arctg} \frac{b_{L1}}{g_1} = \operatorname{arctg} \frac{0,04}{0,02} = \operatorname{arctg} 2 = 64^\circ;$$

$\varphi_2=90^\circ$, так как ветвь чисто емкостная;

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{b}{g} = \operatorname{arctg} \frac{b_{L1} - b_{C2}}{g_1} = \operatorname{arctg} \frac{0,04 - 0,067}{0,02} = \operatorname{arctg}(-1,35) = -53^\circ 30'.$$

Знак «минус» означает, что нагрузка носит активно-емкостный характер, т.е. ток I опережает напряжение U на угол $53^\circ 30'$.

10. Полная мощность

$$S=U \cdot I=127 \cdot 4,27=542 \text{ ВА.}$$

11. Активная мощность

$$P=S \cdot \cos \varphi=542 \cdot 0,59=320 \text{ Вт.}$$

12. Реактивная мощность

$$Q=S \cdot \sin \varphi=542 \cdot 0,8=434 \text{ ВАр.}$$

13. Активные и реактивные токи в ветвях:

$$I_{a1}=U \cdot g_1=127 \cdot 0,02=2,54 \text{ А; } I_{p1}=U \cdot b_1=127 \cdot 0,04=5,08 \text{ А;}$$

$I_{a2}=0$, так как во второй ветви отсутствует активное сопротивление;

$$I_{p2}=I_2=8,47 \text{ А.}$$

14. Масштабы для векторной диаграммы (рис. 34):

по напряжению $m_U = 20 \frac{\text{В}}{\text{см}}$; по току $m_I = 2 \frac{\text{А}}{\text{см}}$.

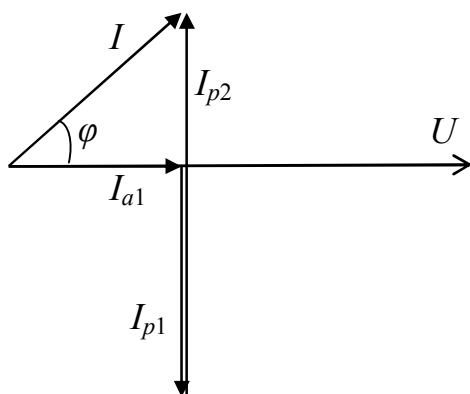


Рис. 34. Векторная

Построение векторной диаграммы следует начинать с вектора напряжения U (см. рис. 34). Затем из начала вектора напряжения проводится вектор тока I_{a1} (активная составляющая тока первой ветви), который совпадает по направлению с вектором напряжения; из конца вектора I_{a1} проводится вектор тока I_{p1} (индуктивная составляющая тока первой ветви), который отстает от напряжения на 90° ; из конца вектора

водится вектор тока I_{p2} (емкостный ток второй ветви), который опережает напряжение на 90° . Вектор тока I в неразветвленной части схемы, равный сумме трех векторов токов в ветвях, проводится от начала вектора I_{a1} к концу вектора I_{p2} . Угол φ является углом сдвига по фазе между напряжением и током в неразветвленной части схемы.

2.9. Пример расчета цепи переменного тока

со смешанным соединением нагрузки

Имеется электрическая цепь (рис. 35).

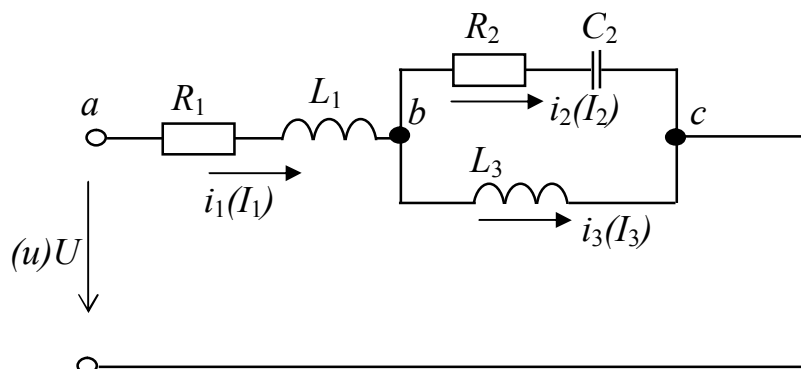


Рис. 35. Схема электрической цепи

со смешанным соединением нагрузки

Дано: $U=220$ В; $f=50$ Гц; $R_1=3$ Ом; $R_2=3$ Ом; $L_1=10$ мГн; $L_3=50$ мГн;
 $C_2=400$ мкФ.

Определить: токи I_1 , I_2 , I_3 ; напряжения на участках цепи U_{ab} , U_{bc} ;
полную мощность S ; активную мощность P ; реактивную мощность Q .

Построить векторную диаграмму. При решении использовать метод проводимостей.

Решение.

1. Реактивные сопротивления:

$$X_{L1}=2\pi fL_1=2\cdot 3,14\cdot 50\cdot 10\cdot 10^{-3}=3,14 \text{ Ом};$$

$$X_{C2}=\frac{1}{2\pi fC_2}=\frac{1}{2\cdot 3,14\cdot 50\cdot 400\cdot 10^{-6}}=8 \text{ Ом};$$

$$X_{L3}=2\pi fL_3=2\cdot 3,14\cdot 50\cdot 50\cdot 10^{-3}=15,7 \text{ Ом}.$$

2. Полное сопротивление каждой ветви (каждая ветвь представляет собой последовательное соединение элементов):

$$Z_1=\sqrt{R_1^2+X_{L1}^2}=\sqrt{3^2+3,14^2}=4,34 \text{ Ом};$$

$$Z_2=\sqrt{R_2^2+X_{C2}^2}=\sqrt{3^2+8^2}=8,5 \text{ Ом};$$

$$Z_3=\sqrt{R_3^2+X_{L3}^2}=\sqrt{0^2+15,7^2}=15,70 \text{ Ом}.$$

3. Для определения эквивалентного сопротивления параллельно соединенных второй и третьей ветвей найдем проводимости этих ветвей. Активные и реактивные проводимости определяются по формулам:

$$g=\frac{R}{Z^2}; b=\frac{X}{Z^2}.$$

Активная проводимость второй ветви

$$g_2 = \frac{R_2}{Z_2^2} = \frac{3}{8,5^2} = 0,0414 \text{ См.}$$

Реактивная (емкостная) проводимость второй ветви

$$b_{C2} = \frac{X_{C2}}{Z_2^2} = \frac{8}{8,5^2} = 0,1105 \text{ См.}$$

Так как активное сопротивление в третьей ветви отсутствует, ее активная проводимость $g_3=0$.

Реактивная (индуктивная) проводимость третьей ветви

$$b_{L3} = \frac{X_{L3}}{Z_3^2} = \frac{15,7}{15,7^2} = 0,0637 \text{ См.}$$

Полная проводимость параллельного участка

$$\begin{aligned} y_{bc} &= \sqrt{(g_2 + g_3)^2 + (b_{L3} - b_{C2})^2} = \\ &= \sqrt{(0,0414 + 0)^2 + (0,0637 - 0,1105)^2} = 0,0622 \text{ См.} \end{aligned}$$

При сложении реактивных проводимостей емкостная проводимость по отношению к индуктивной берется со знаком «минус».

4. По найденным значениям проводимостей параллельных ветвей определим эквивалентные активное и реактивное сопротивления параллельного участка:

$$\begin{aligned} R_{bc} &= \frac{g_{bc}}{y_{bc}^2} = \frac{g_2 + g_3}{y_{bc}^2} = \frac{0,0414 + 0}{0,0622^2} = 10,7 \text{ Ом;} \\ X_{bc} &= \frac{b_{bc}}{y_{bc}^2} = \frac{b_{L3} - b_{C2}}{y_{bc}^2} = \frac{0,0637 - 0,1105}{0,0622^2} = -12,1 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

В параллельном участке цепи преобладает емкостная проводимость (сопротивление X_{bc} получилось со знаком «минус»), поэтому эквивалентное реактивное сопротивление будет емкостным. В результате расчета сопротивлений R_{bc} и X_{bc} эквивалентную схему можно представить как одноконтурную (рис. 36).

Эквивалентное сопротивление всей цепи

$$Z_{\text{экв}} = \sqrt{(R_1 + R_{bc})^2 + (X_{L1} - X_{bc})^2} = \\ = \sqrt{(3 + 10,7)^2 + (3,14 - 12,1)^2} = 16,35 \text{ Ом.}$$

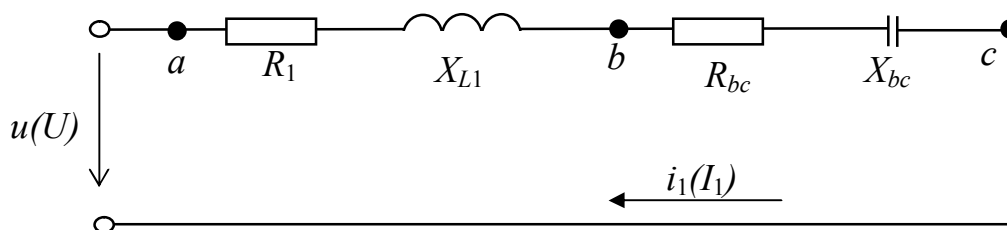


Рис. 36. Эквивалентная схема для расчета цепи со смешанным соединением нагрузки

5. Ток в неразветвленной части схемы

$$I_1 = \frac{U}{Z_{\text{экв}}} = \frac{220}{16,35} = 13,45 \text{ А.}$$

6. Падения напряжений на участках цепи:

$$U_{bc} = I_1 Z_{bc} = \frac{I_1}{y_{bc}} = \frac{13,45}{0,0622} = 218 \text{ В; } U_{ab} = I_1 Z_1 = 13,45 \cdot 4,34 = 58,4 \text{ В.}$$

7. Токи в параллельных ветвях:

$$I_2 = \frac{U_{bc}}{Z_2} = \frac{218}{8,5} = 25,7 \text{ А; } I_3 = \frac{U_{bc}}{Z_3} = \frac{218}{15,7} = 13,9 \text{ А.}$$

8. Определим мощности.

Полная мощность

$$S = U \cdot I = 220 \cdot 13,45 = 2960 \text{ ВА} = 2,96 \text{ кВА.}$$

Активная мощность

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi = S \cdot \cos \varphi,$$

где

$$\cos \varphi = \frac{R_{\text{экв}}}{Z_{\text{экв}}} = \frac{R_1 + R_{bc}}{Z_{\text{экв}}} = \frac{3 + 10,7}{16,35} = 0,84.$$

$$P = 2960 \cdot 0,84 = 2490 \text{ Вт} = 2,49 \text{ кВт.}$$

Реактивная мощность

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi = S \cdot \sin \varphi,$$

где

$$\sin \varphi = \frac{X_{\text{экв}}}{Z_{\text{экв}}} = \frac{X_{L1} - X_{bc}}{Z_{\text{экв}}} = \frac{3,14 - 12,1}{16,35} = 0,54.$$

$$Q = 2960 \cdot 0,54 = 1600 \text{ ВАр} = 1,6 \text{ кВАр}.$$

Построение векторной диаграммы (рис. 37) удобно начинать с параллельного участка цепи. Приняв начальную фазу напряжения U_{bc} равной нулю, определим углы сдвига фаз φ_2 (между напряжением U_{bc} и током I_2) и φ_3 (между напряжением U_{bc} и током I_3).

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_2}{Z_2} = \frac{3}{8,5} = 0,353; \varphi_2 = 69^\circ 20';$$

$$\cos \varphi_3 = \frac{R_3}{Z_3} = \frac{0}{15,7} = 0; \varphi_3 = 90^\circ.$$

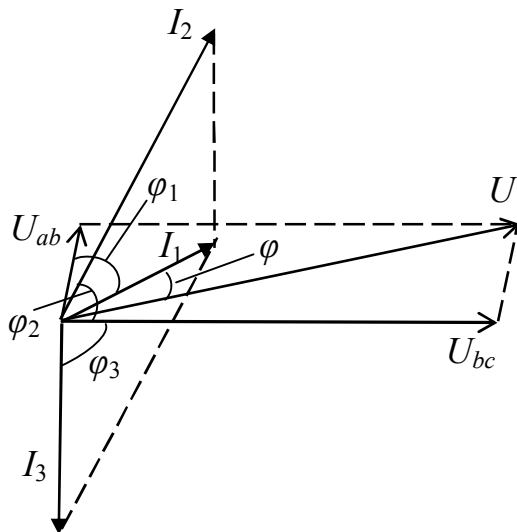


Рис. 37. Векторная диаграмма для схемы со смешанным включением нагрузки

В соответствии с первым законом Кирхгофа для узла b (см. рис. 35)

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2 + \bar{I}_3,$$

то есть вектор тока I_1 равен сумме векторов токов I_2 и I_3 .

Определим угол φ_1 сдвига по фазе между током I_1 и напряжением U_{ab} на последовательном участке.

$$\cos \varphi_1 = \frac{R_1}{Z_1} = \frac{3}{4,34} = 0,692;$$

$$\varphi_1 = 46^\circ 15'.$$

Так как нагрузка на этом участке активно-индуктивная, то напряжение U_{ab} будет опережать по фазе ток I_1 на угол φ_1 .

В соответствии со вторым законом Кирхгофа (см. рис. 35)

$$\bar{U} = \bar{U}_{ab} + \bar{U}_{bc},$$

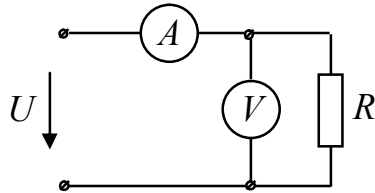
то есть вектор напряжения U равен сумме векторов напряжений U_{ab} и U_{bc} .

Угол сдвига по фазе между напряжением U и током I_1 можно определить из построенной в масштабе векторной диаграммы, а также по параметрам эквивалентной схемы (см. рис. 36)

$$\cos \varphi = \frac{R_{\text{экв}}}{Z_{\text{экв}}} = \frac{13,7}{16,35} = 0,84; \varphi = 32^\circ 45'.$$

Контрольные вопросы по однофазным
электрическим цепям переменного тока

1. Напряжение на зажимах данной цепи $u=100 \sin \omega t$. Определить показания амперметра и вольтметра, если $R=100 \text{ Ом}$.



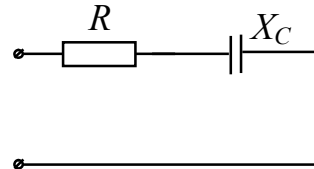
- 1) $I = 2 \text{ A}$; $U = 100 \text{ В}$;
- 2) $I = 0,7 \text{ A}$; $U = 70 \text{ В}$;
- 3) $I = 0,7 \text{ A}$; $U = 100 \text{ В}$.

2. Какие потребители электрической энергии можно отнести к резистивным элементам с активными сопротивлениями?

- 1) лампы накаливания, реостаты, дроссели и конденсаторы;
- 2) реостаты, лампы накаливания, утюг;
- 3) компрессор, электроплита;
- 4) электронасос, вентилятор, электробритва.

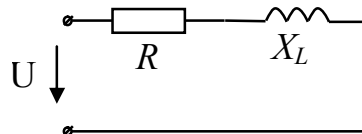
3. Цепь переменного тока состоит из последовательно включенных резистора $R=40 \text{ Ом}$ и конденсатора с сопротивлением $X_C=30 \text{ Ом}$. Определить полное сопротивление цепи.

- 1) 100 Ом ;
- 2) 50 Ом ;
- 3) 80 Ом ;
- 4) 10 Ом .



4. По какой формуле определяется полное сопротивление данной цепи?

- 1) $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$;
- 2) $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$;
- 3) $Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$;
- 4) $Z = R$.

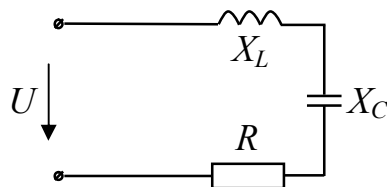


5. Какая формула для расчета тока справедлива для данной цепи?

$$1) I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}};$$

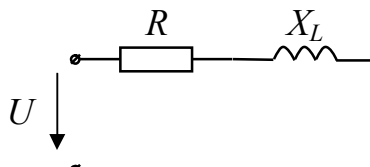
$$2) I = \frac{U}{R};$$

$$3) I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}.$$

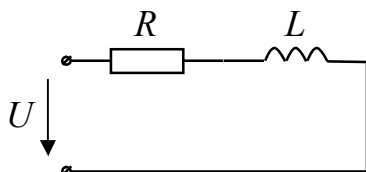


6. Цепь переменного тока, к которой приложено напряжение $U=220$ В, состоит из последовательно включенных резистора $R=40$ Ом и катушки индуктивности с сопротивлением $X_L=30$ Ом. Определить ток, проходящий в данной цепи.

- 1) 4,4 А;
- 2) 6 А;
- 3) 8,6 А;
- 4) 10 А.

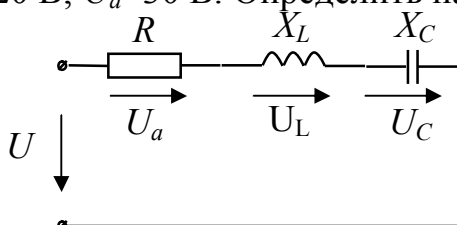


7. Напряжения на отдельных участках цепи с R и L элементами $U=141$ В. Определить напряжения U_R и U_L , если частота питающего напряжения $f=0$.



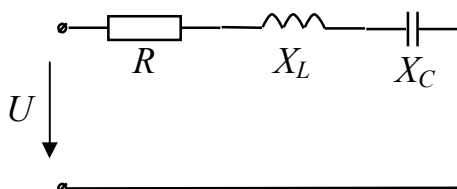
- 1) $U_R=70,5$ В; $U_L=70,5$ В;
- 2) $U_R=100$ В; $U_L=100$ В;
- 3) $U_R=141$ В; $U_L=0$ В;
- 4) $U_R=0$ В; $U_L=141$ В.

8. Напряжения на отдельных участках цепи составляют: $U_L=60$ В; $U_C=20$ В; $U_a=30$ В. Определить напряжение U .



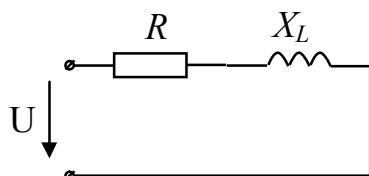
- 1) 40 В;
- 2) 100 В;
- 3) 50 В;
- 4) 80 В.

9. В каком случае наступит резонанс напряжений в приведенной цепи?



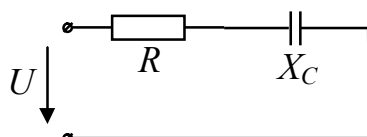
- 1) $X_L > X_C$;
- 2) $X_L < X_C$;
- 3) $X_L = X_C$.

10. Какая векторная диаграмма соответствует указанной цепи?



- 1)
- 2)
- 3)

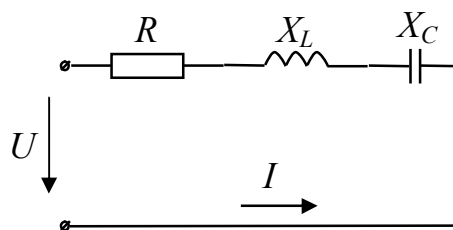
11. Какая векторная диаграмма соответствует указанной цепи?



- 1)
- 2)
- 3)

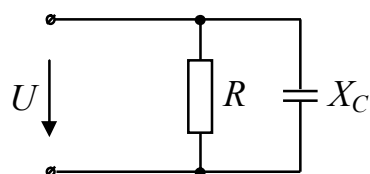
12. Какая векторная диаграмма соответствует данной цепи при условии $X_L = X_C$?

- 1)
- 2)
- 3)

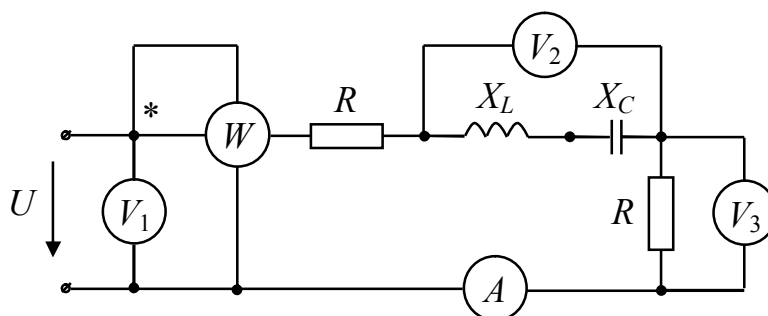


13. Какая векторная диаграмма соответствует указанной цепи?

- 1)
- 2)
- 3)



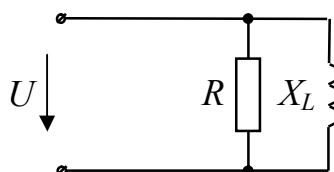
14. В схеме наблюдается резонанс напряжений. Показание вольтметра V_3 равно 4 В; амперметр A показывает 1 А; сопротивление $X_C=3$ Ом. Определить правильные показания приборов.



- 1) вольтметр V_2 показывает 0;
- 2) ваттметр W показывает 16 Вт;
- 3) вольтметр V_1 показывает 5 В.

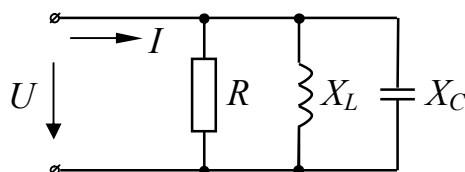
15. Какая векторная диаграмма соответствует указанной цепи?

- 1)
- 2)
- 3)



16. Цепь переменного тока, к которой приложено напряжение $U=220$ В, состоит из параллельно включенных резисторов: $R=22$ Ом, идеальной катушки индуктивности с сопротивлением $X_L=30$ Ом и конденсатора с сопротивлением $X_C=30$ Ом. Определить ток I .

- 1) 10 А;
- 2) 5 А;
- 3) 22 А;
- 4) 7 А.



17. В какой цепи может возникнуть резонанс токов?

- 1)
- 2)
- 3)
- 4)

18. По какой формуле рассчитывается активная мощность в цепи однофазного тока с активно-реактивной нагрузкой?

1) $Q = I \cdot U \cdot \sin \varphi$;

2) $P = I \cdot U \cdot \cos \varphi$;

3) $Q = I \cdot U$;

4) $P = I \cdot U$.

19. Как зависит коэффициент мощности $\cos \varphi$ в цепи переменного тока от изменения сопротивления R при условии, что X_L и X_C – постоянные параметры?

1) увеличивается с возрастанием R ;

2) уменьшается с возрастанием R ;

3) остается неизменным.

3. ТРЕХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

3.1. Основные понятия трехфазной цепи

В настоящее время широкое распространение получили трехфазные цепи, что объясняется следующими причинами:

–при одинаковых напряжениях, мощностях потребителей питание от трехфазной сети позволяет получить значительную экономию материала проводов по сравнению с тремя однофазными линиями;

–трехфазный генератор дешевле, легче и экономичнее, чем три однофазных генератора такой же общей мощности;

–трехфазная система токов позволяет получить вращающееся магнитное поле, которое заложено в принципе действия асинхронных двигателей.

Трехфазной цепью называется совокупность трех цепей, в которых ЭДС источников энергии имеют одинаковую частоту, но сдвинуты между собой по фазе на 120° .

Трехфазная система электрических цепей представляет собой совокупность электрических цепей, в которых действуют три синусоидальные ЭДС одной и той же частоты, сдвинутые относительно друг друга по фазе и создаваемые общим источником питания.

Система трех ЭДС, равных по величине и сдвинутых по фазе на 120° по отношению друг к другу, называется симметричной.

Часть трехфазной электрической цепи, в которой протекает один из токов трехфазной системы, называется *фазой*. Фазой являются обмотка генератора, в которой индуцируется ЭДС, и приемник, подключенный к этой обмотке.

Таким образом, *однофазная цепь, входящая в состав трехфазной цепи, называется фазой.*

3.2. Получение трехфазной системы ЭДС

Трехфазная система ЭДС создается трехфазными генераторами. В неподвижной части генератора (статоре) размещают три обмотки, сдвинутые в пространстве на 120° . Это фазные обмотки, или фазы, начала которых обозначают буквами *A, B, C*; концы обмоток обозначают буквами *X, Y, Z*. На вращающейся части генератора (роторе) располагают обмотку

возбуждения, которая питается от источника постоянного тока. Ток обмотки возбуждения создает магнитный поток Φ_0 , постоянный (неподвижный) относительно ротора, но вращающийся вместе с ротором с частотой n . При вращении ротора вращающийся вместе с ним магнитный поток пересекает проводники обмоток статора ($A-X$, $B-Y$, $C-Z$) и индуцирует в них синусоидальные ЭДС (рис. 38). Мгновенные значения этих ЭДС:

$$\left. \begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t; \\ e_B &= E_m \sin(\omega t - 120^\circ); \\ e_C &= E_m \sin(\omega t - 240^\circ), \end{aligned} \right\} \quad (122)$$

где E_m – амплитудное значение ЭДС каждой фазы.

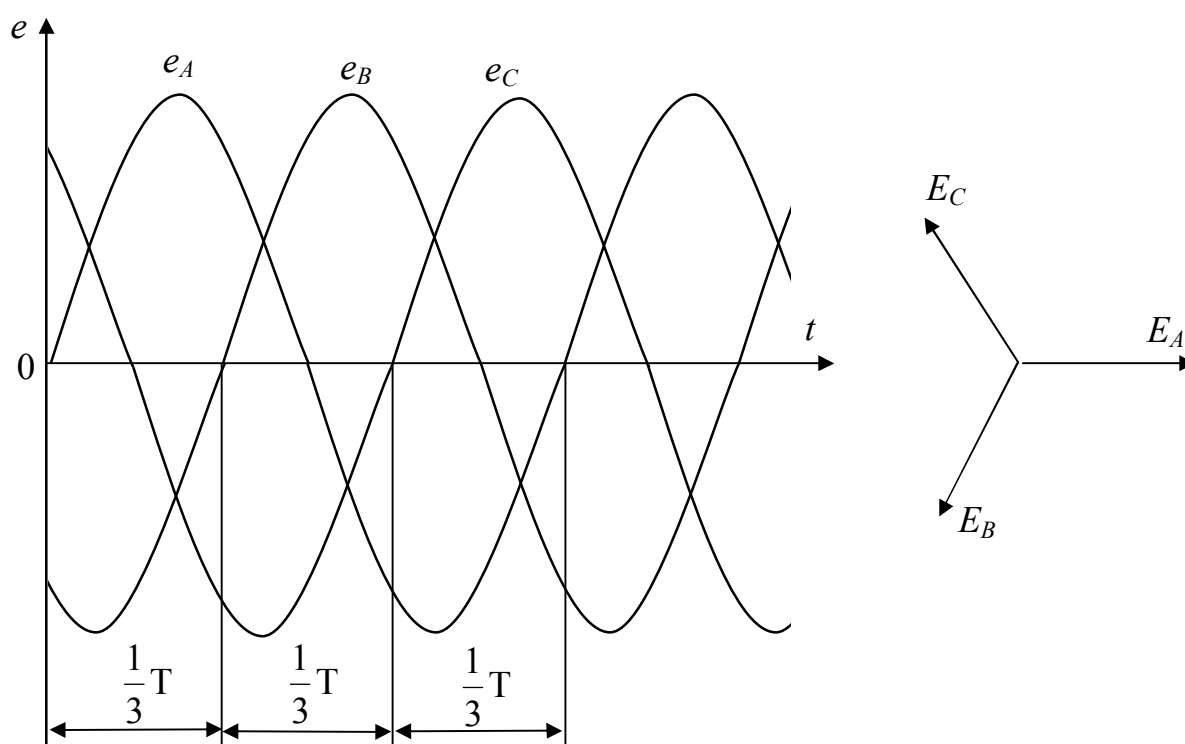


Рис. 38. График мгновенных значений и векторная диаграмма

трехфазной системы ЭДС

Трехфазный генератор, соединенный проводами с трехфазным потребителем, образует трехфазную цепь. В трехфазной цепи протекает трехфазная система токов, т.е. синусоидальные токи с тремя различными фазами.

В трехфазных цепях различают прямую и обратную последовательности фаз подводимого к нагрузке напряжения. При прямой последовательности фаз (рис. 39) напряжение каждой последующей фазы отстает от напряжения предыдущей на угол 120° :

$$\left. \begin{aligned} u_A &= U_m \sin \omega t; \\ u_B &= U_m \sin(\omega t - 120^\circ); \\ u_C &= U_m \sin(\omega t - 240^\circ), \end{aligned} \right\} \quad (123)$$

где U_m – амплитудное значение напряжения каждой фазы.

При обратной последовательности фаз (рис. 40) напряжение каждой последующей фазы опережает напряжение предыдущей на угол 120° :

$$\left. \begin{aligned} u_A &= U_m \sin \omega t; \\ u_B &= U_m \sin(\omega t + 120^\circ); \\ u_C &= U_m \sin(\omega t + 240^\circ), \end{aligned} \right\} \quad (124)$$

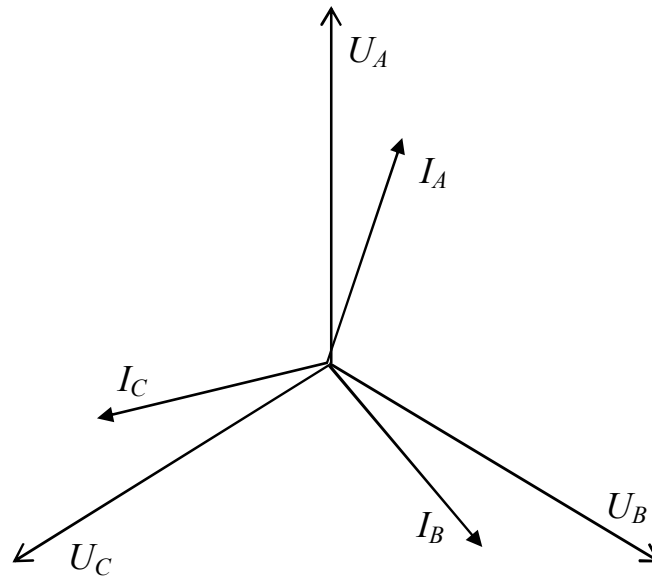


Рис. 39. Векторная диаграмма трехфазных напряжений и токов при прямой последовательности фаз питающего напряжения и активно-индуктивной нагрузке

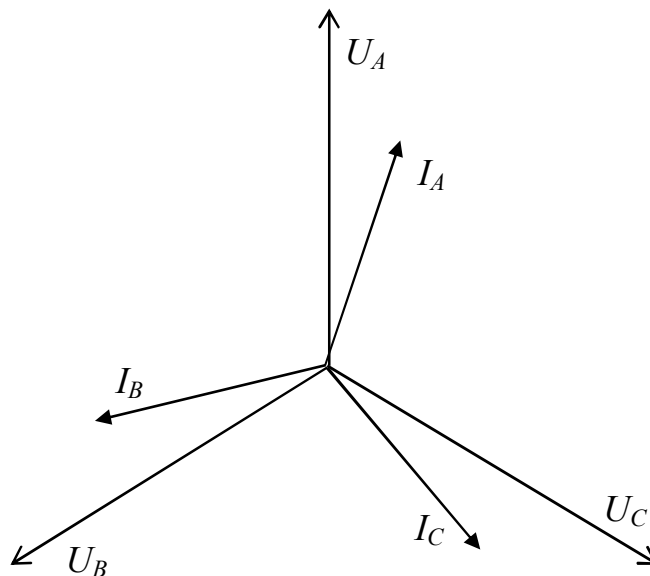


Рис. 40. Векторная диаграмма трехфазных напряжений и токов при обратной последовательности фаз питающего

От последовательности фаз системы напряжений зависит, например, направление вращения ротора асинхронного двигателя.

Отдельные фазы трехфазной цепи принято обозначать буквами A , B , C , а шины на станциях и подстанциях окрашивать соответственно: A – в желтый, B – в зеленый, C – в красный цвет.

Возможны различные способы соединения обмотки генератора с нагрузкой.

3.3. Схема соединения «звездой» в трехфазных цепях

Несвязанная трехфазная цепь, в которой каждая обмотка генератора питает свою фазную нагрузку (рис. 41), требует шесть соединительных проводов. Такая схема практически не применяется.

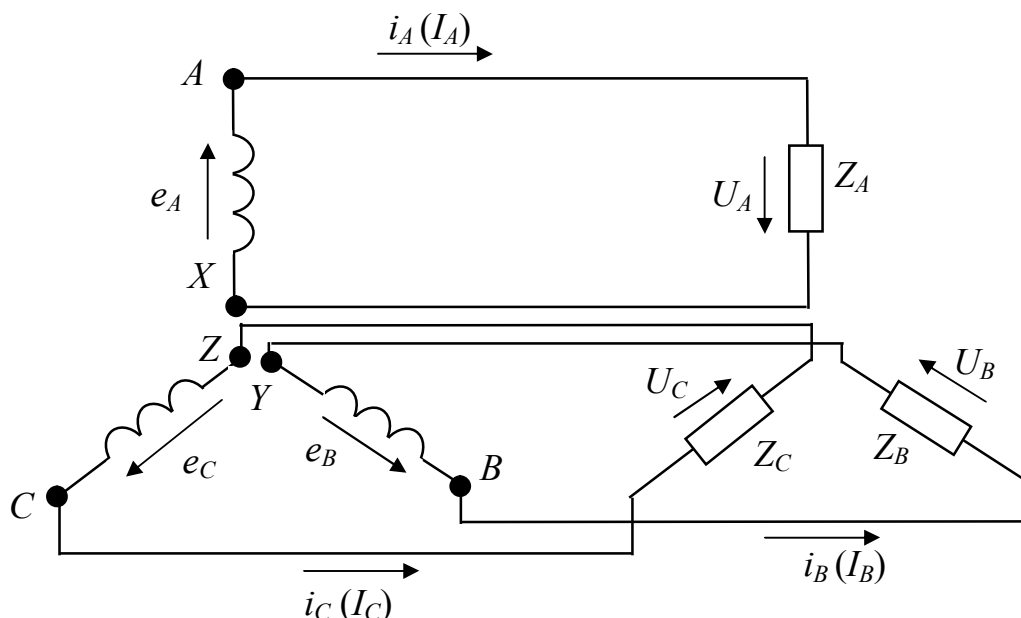


Рис. 41. Несвязанная трехфазная цепь

На практике используют связанные трехфазные цепи, при этом число соединительных проводов от генератора к нагрузке уменьшается до трех или четырех.

На электрических схемах трехфазный генератор принято изображать в виде трех обмоток, расположенных под углом 120° друг к другу.

При соединении фаз трехфазного генератора или приемника электрической энергии «звездой» (рис. 42) концы фаз источника или приемника X , Y , Z объединены в общую точку N , которая называется

нейтральной или нулевой точкой, а начала фаз подключаются к соответствующим линейным проводам.

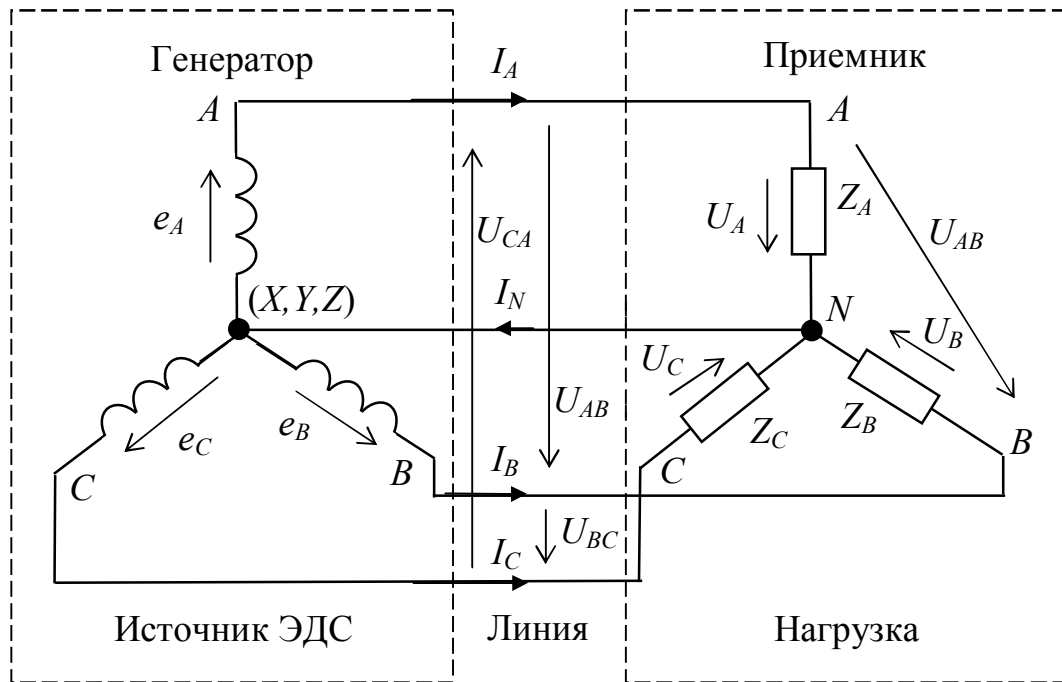


Рис. 42. Трехфазная схема при соединении обмоток генератора и приемника по схеме «звезда»

Провода, соединяющие начало фаз генератора и приемника электрической энергии, называются *линейными проводами*, а провод, соединяющий концы фаз генератора и приемника электрической энергии, называется *нейтральным* или *нулевым*.

В связанных трехфазных цепях различают фазные и линейные напряжения и токи. *Фазным* называется напряжение между началом и концом фазы генератора или приемника. Фазные напряжения обозначаются прописными буквами с одним буквенным индексом: U_A , U_B , U_C . *Линейным* называется напряжение между началами фаз генератора (или приемника) или напряжение между линейными проводами. Линейные напряжения обозначаются прописными буквами с двойным буквенным индексом: U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} .

Каждое линейное напряжение при соединении обмоток генератора «звездой» определяется векторной разностью двух составляющих фазных напряжений.

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}_{AB} &= \bar{U}_A - \bar{U}_B; \\ \bar{U}_{BC} &= \bar{U}_B - \bar{U}_C; \\ \bar{U}_{CA} &= \bar{U}_C - \bar{U}_A. \end{aligned} \right\} \quad (125)$$

Векторную диаграмму, удовлетворяющую уравнениям (125), можно начинать строить с изображения векторов фазных напряжений, выходящих из одной точки под углом 120° друг к другу (рис. 43).

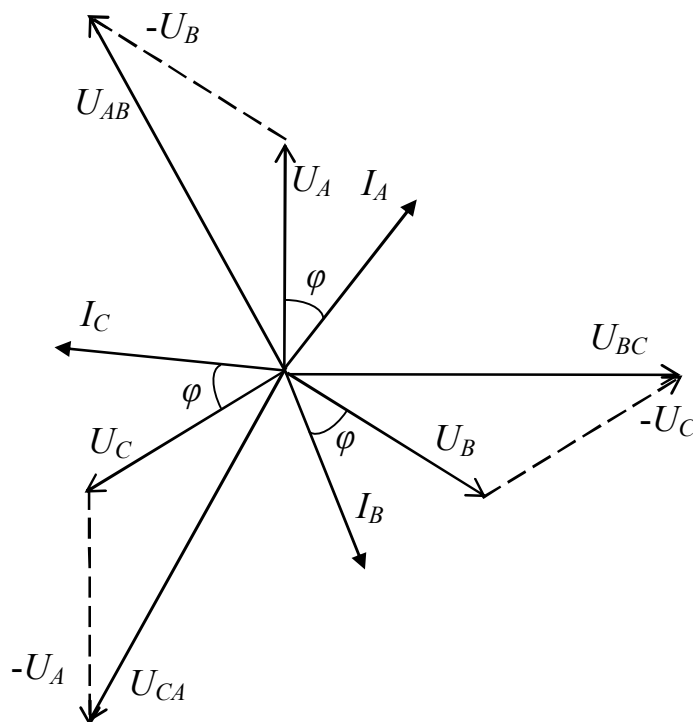


Рис. 43. Векторная диаграмма трехфазной цепи при соединении симметричной активно-индуктивной нагрузки «звездой». Векторы линейных и фазных напряжений выходят из одной точки

Вектор $\bar{U}_{AB}$ определится как сумма векторов $\bar{U}_A$ и $\bar{U}_B$, вектор $\bar{U}_{BC}$ – как сумма векторов $\bar{U}_B$ и $\bar{U}_C$, и вектор $\bar{U}_{CA}$ – как сумма векторов $\bar{U}_C$ и $\bar{U}_A$.

Для полноты картины на векторной диаграмме изображаются также векторы токов, отстающих на угол φ от векторов соответствующих напряжений (нагрузка считается симметричной активно-индуктивной).

Уравнениям (125), связывающим векторы фазных и линейных напряжений, удовлетворяет также векторная диаграмма, изображенная на рис. 44. Такую векторную диаграмму называют топографической.

Вектор, соединяющий концы двух векторов фазных напряжений, исходящих из одной точки, является их разностью. Векторы линейных напряжений образуют равносторонний треугольник.

Из векторной диаграммы

$$U_{BC} = 2U_C \cos 30^\circ = 2U_C \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3}U_C. \quad (126)$$

Следовательно, между линейным и фазным напряжением в схеме «звезда» существует зависимость

$$U_L = \sqrt{3} U_\phi. \quad (127)$$

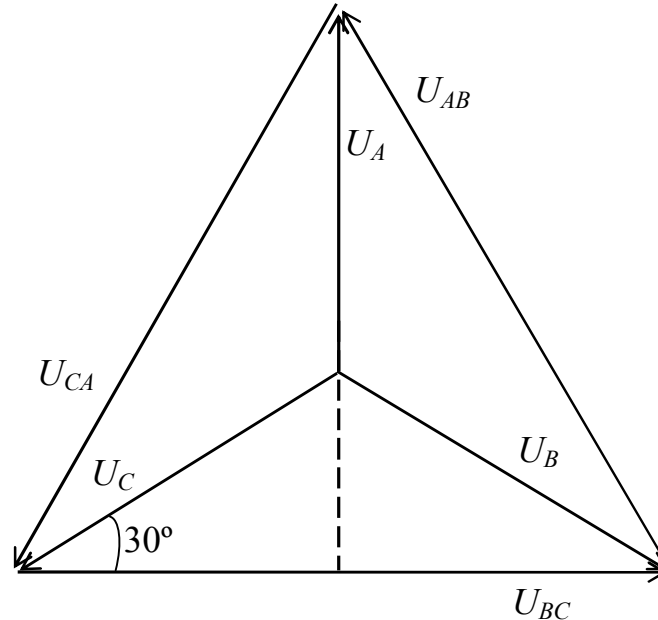


Рис. 44. Топографическая векторная диаграмма трехфазной цепи при соединении нагрузки «звездой». Векторы линейных напряжений образуют равносторонний треугольник

Соотношение (127) выполняется:

- при наличии нейтрального провода при симметричной и несимметричной нагрузках;
- при отсутствии нейтрального провода только при симметричной нагрузке.

Ток, протекающий по линейному проводу, называется линейным током I_L . Ток, протекающий между началом и концом фазы, называется фазным током I_ϕ . При соединении «звездой»

$$I_L = I_\phi. \quad (128)$$

Ток в нейтральном проводе в соответствии с первым законом Кирхгофа (см. рис. 28) определится суммой мгновенных значений токов фаз:

$$i_N = i_A + i_B + i_C. \quad (129)$$

Для действующих значений рассматривается векторная сумма фазных токов:

$$\bar{I}_N = \bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C. \quad (130)$$

Токи в фазах определяются по закону Ома:

$$I_A = \frac{U_A}{Z_A}; I_B = \frac{U_B}{Z_B}; I_C = \frac{U_C}{Z_C}. \quad (131)$$

При симметричной нагрузке

$$I_A = I_B = I_C; \quad \varphi_A = \varphi_B = \varphi_C, \quad (132)$$

где $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$ – углы сдвига по фазе между фазными напряжениями и фазными токами.

В соответствии с первым законом Кирхгофа для точки N (см. рис. 28)

$$\bar{I}_N = \bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C = 0. \quad (133)$$

Следовательно, при симметричной нагрузке (см. рис. 43) ток нейтрального провода как векторная сумма фазных токов равен нулю (сумма трех векторов одинаковой длины, выходящих из одной точки под углом 120° друг к другу).

Нейтральный провод в этом случае не нужен, и схема из четырехпроводной превращается в трехпроводную.

При несимметричной нагрузке обрыв нейтрального провода вызывает значительное изменение фазных токов, а следовательно, и фазных напряжений, что в большинстве случаев недопустимо. Потребители, рассчитанные на фазное напряжение, при уменьшении фазного напряжения будут работать не в номинальном режиме, при увеличении фазного напряжения могут выйти из строя. Поэтому в цепь нейтрального провода предохранители и устройства защиты не устанавливаются.

Таким образом, при несимметричной нагрузке наличие нейтрального провода обязательно.

3.4. Схема соединения «треугольником» в трехфазных цепях

При соединении обмоток генератора «треугольником» (рис. 45) конец обмотки фазы A (X) соединяется с началом обмотки фазы B , конец обмотки фазы B (Y) соединяется с началом обмотки фазы C , конец обмотки фазы C (Z) соединяется с началом обмотки фазы A . К точкам соединения подключаются линейные провода. При соединении «треугольником» трехфазная цепь трехпроводная. В этой цепи линейное напряжение равно фазному.

$$U_L = U_\phi. \quad (134)$$

Применяя первый закон Кирхгофа к узлам A, B и C , найдем связь между линейными и фазными токами. Линейные токи обозначаются прописными буквами с одним буквенным индексом: I_A, I_B, I_C , а фазные токи – прописными буквами с двойным буквенным индексом: I_{AB}, I_{BC}, I_{CA} .

При соединении нагрузки «треугольником» для векторов тока в соответствии с первым законом Кирхгофа справедливы соотношения:

$$\left. \begin{aligned} \bar{I}_A &= \bar{I}_{AB} - \bar{I}_{CA}; \\ \bar{I}_B &= \bar{I}_{BC} - \bar{I}_{AB}; \\ \bar{I}_C &= \bar{I}_{CA} - \bar{I}_{BC}. \end{aligned} \right\} \quad (135)$$

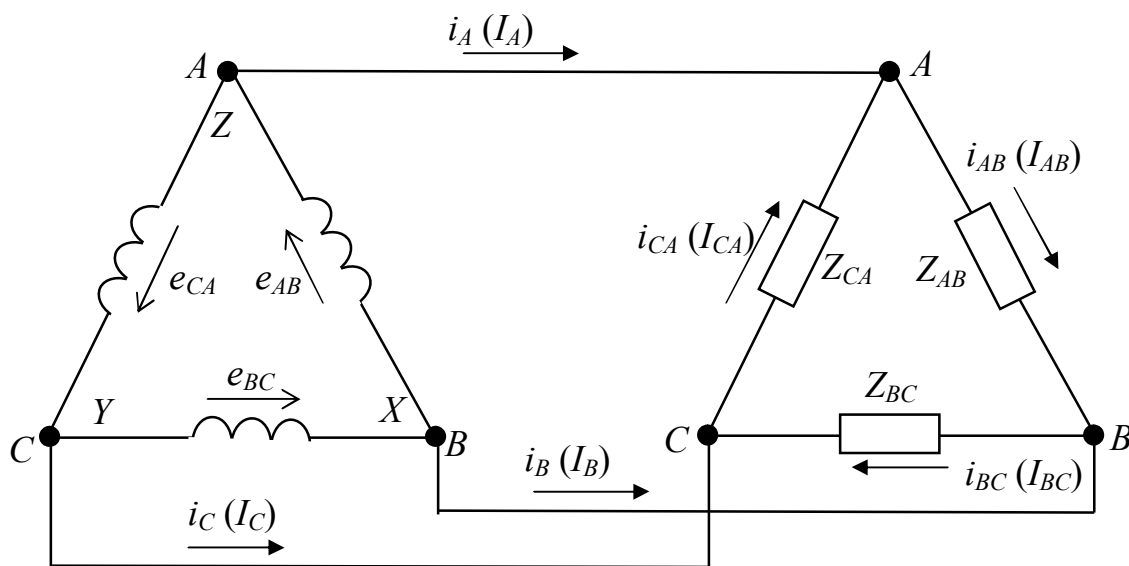


Рис. 45. Соединение обмоток генератора и нагрузки «треугольником»

Уравнениям (135) удовлетворяет векторная диаграмма на рис. 46. На этой диаграмме векторы линейных и фазных токов выходят из одной точки.

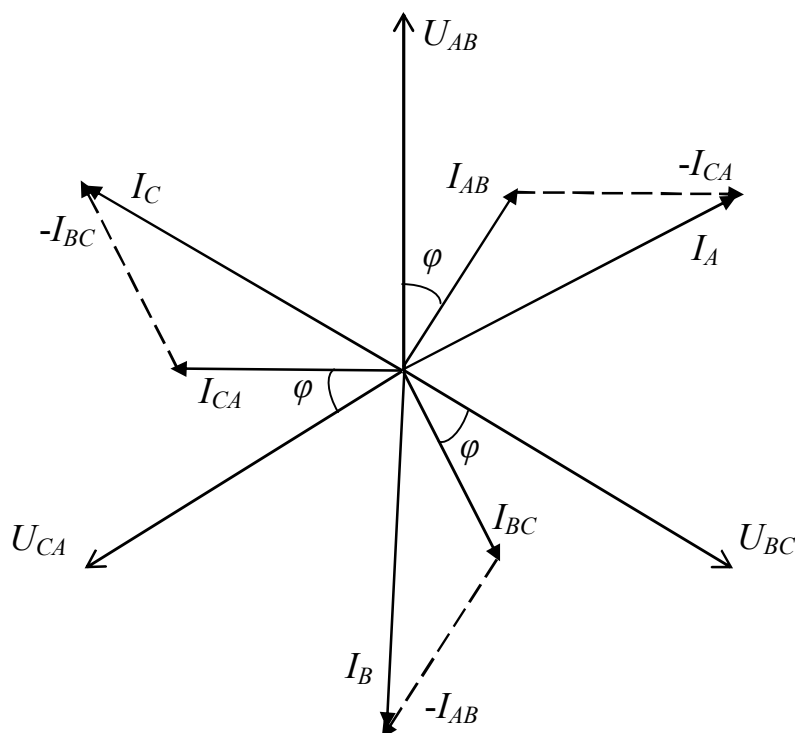


Рис. 46. Векторная диаграмма трехфазной цепи при соединении симметричной активно-индуктивной нагрузки «треугольником». Векторы линейных и фазных токов выходят из одной точки

При симметричной нагрузке:

$$I_A = I_B = I_C = I_{\text{Л}}; \quad (136)$$

$$I_{AB} = I_{BC} = I_{CA} = I_{\Phi}. \quad (137)$$

Как видно из векторной диаграммы, при симметричной нагрузке

$$I_{\text{Л}} = 2I_{\Phi} \cos 30^\circ = 2I_{\Phi} \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} I_{\Phi}. \quad (138)$$

Таким образом, при соединении «треугольником»:

– всегда

$$U_{\text{Л}} = U_{\Phi}; \quad (139)$$

– при симметричной нагрузке

$$I_{\text{Л}} = \sqrt{3} I_{\Phi}; \quad (140)$$

– при несимметричной нагрузке для токов справедливы соотношения (135).

Иногда при анализе трехфазной цепи с нагрузкой, соединенной «треугольником», используют топографическую векторную диаграмму, которую строят исходя из того, что $U_{\Phi} = U_{\text{Л}}$. При этом векторы фазных напряжений, равных линейным напряжениям, изображаются как стороны равностороннего треугольника (рис. 47).

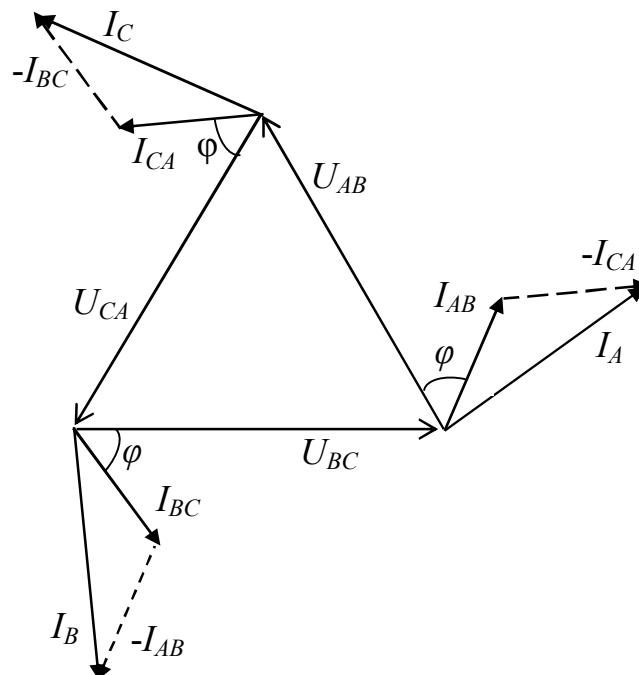


Рис. 47. Топографическая векторная диаграмма
трехфазной цепи при соединении симметричной
активно-индуктивной нагрузки «треугольником».

Векторы напряжений образуют
равносторонний треугольник

3.5. Мощность в трехфазных цепях

3.5.1. Мощность трехфазной цепи при любом характере нагрузки

Любую схему соединения нагрузки трехфазной цепи можно путем преобразований привести к эквивалентной схеме соединения «звездой».

Трехфазная электрическая цепь состоит из трех однофазных цепей (фаз), поэтому мощности трехфазной цепи можно определить суммой мощностей отдельных фаз.

Активная мощность трехфазной цепи

$$P = P_A + P_B + P_C, \quad (141)$$

где P_A, P_B, P_C – активные мощности фаз A, B, C соответственно.

$$\left. \begin{aligned} P_A &= U_A I_A \cos \varphi_A; \\ P_B &= U_B I_B \cos \varphi_B; \\ P_C &= U_C I_C \cos \varphi_C, \end{aligned} \right\} \quad (142)$$

где U_A, U_B, U_C – фазные напряжения; I_A, I_B, I_C – фазные токи;
 $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$ – углы сдвига по фазе между соответствующими фазными
напряжениями и фазными токами.

При симметричной нагрузке

$$P_A = P_B = P_C = U_\Phi I_\Phi \cos \varphi. \quad (143)$$

При этом условии с учетом выражений (127), (128), (139), (140) и
(141) активная мощность трехфазной цепи

$$P = 3U_\Phi I_\Phi \cos \varphi = \sqrt{3} U_{Л} I_{Л} \cos \varphi. \quad (144)$$

Аналогичным образом определяются реактивная и полная
мощности трехфазной цепи.

Реактивная мощность трехфазной цепи

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C, \quad (145)$$

где Q_A, Q_B, Q_C – реактивные мощности фаз A, B, C соответственно.

$$\left. \begin{aligned} Q_A &= U_A I_A \sin \varphi_A; \\ Q_B &= U_B I_B \sin \varphi_B; \\ Q_C &= U_C I_C \sin \varphi_C. \end{aligned} \right\} \quad (146)$$

При симметричной нагрузке

$$Q_A = Q_B = Q_C = U_\Phi I_\Phi \sin \varphi. \quad (147)$$

При этом условии с учетом выражений (127), (128), (139), (140) и (145) реактивная мощность трехфазной цепи

$$Q = 3U_{\Phi}I_{\Phi} \sin \varphi = \sqrt{3}U_{Л}I_{Л} \sin \varphi. \quad (148)$$

Полная мощность трехфазной цепи

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (149)$$

Полная мощность при симметричной нагрузке

$$S = 3U_{\Phi}I_{\Phi} = \sqrt{3}U_{Л}I_{Л}. \quad (150)$$

3.5.2. Измерение активной мощности в трехфазных цепях

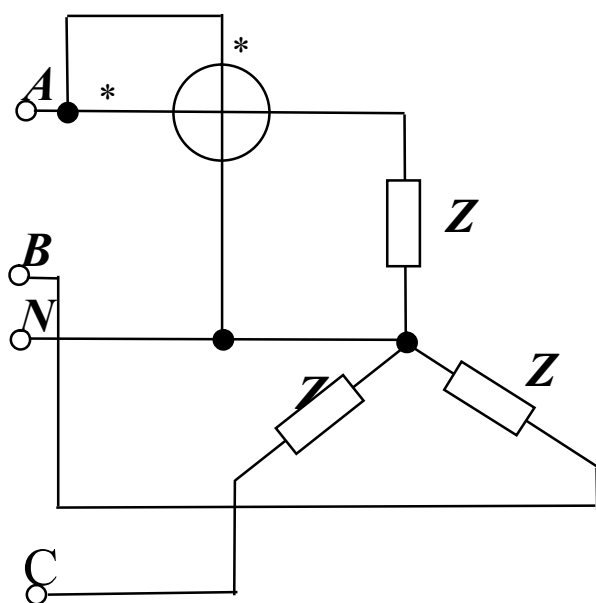
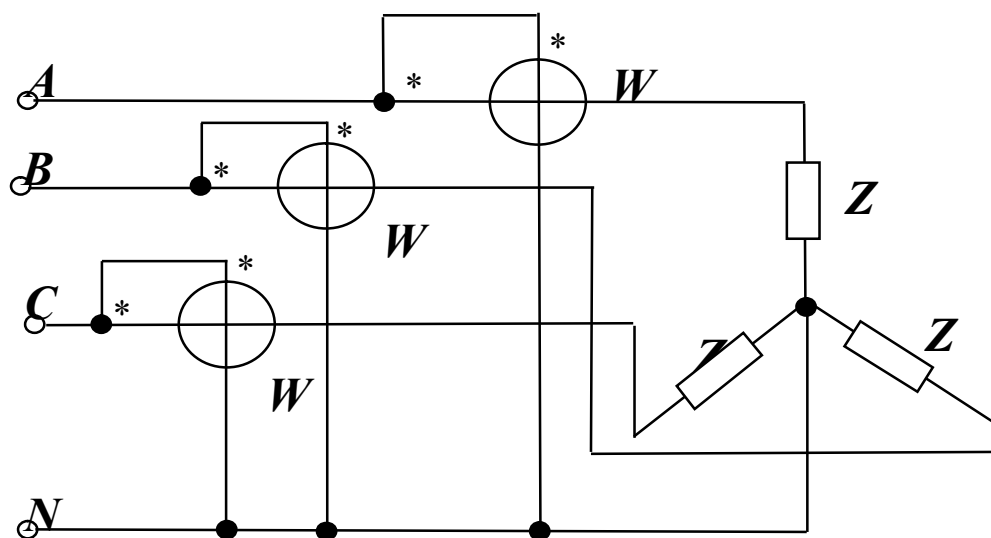
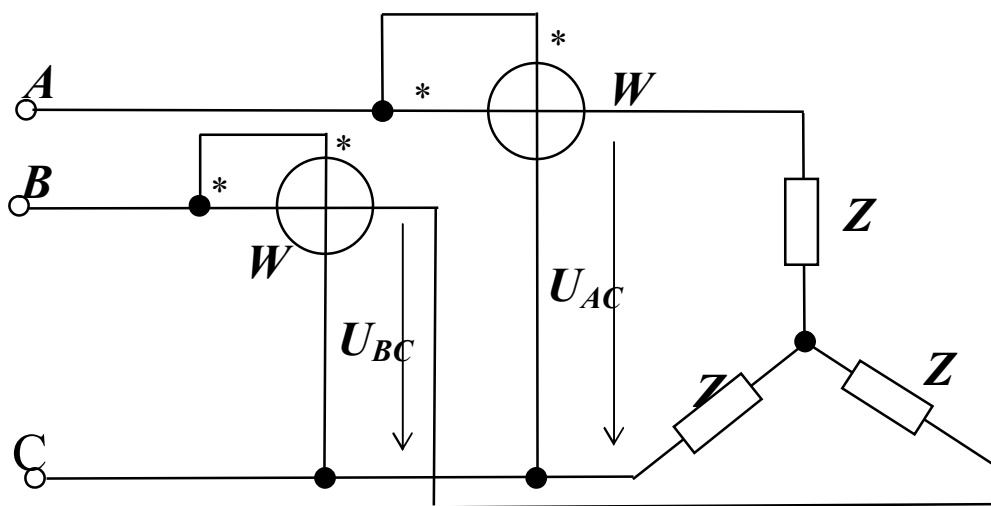


Рис. 48. Измерение активной мощности одним ваттметром

Для измерения мощности трехфазной системы применяют различные схемы включения ваттметров. При симметричной нагрузке в четырехпроводной цепи активную мощность можно измерить одним ваттметром, включенным по схеме, изображенной на рис. 48.



**Рис. 49. Измерение активной мощности тремя ваттметрами
в трехфазной четырехпроводной цепи при несимметричной нагрузке**



**Рис. 50. Измерение активной мощности двумя ваттметрами в трехфазной
трехпроводной цепи при симметричной и несимметричной нагрузках**

В трехпроводных трехфазных цепях при симметричной и несимметричной нагрузках широко применяют схему измерения мощности при помощи двух ваттметров (рис. 50). На этой схеме токовые (последовательные) обмотки ваттметров включены в фазы A и B , а потенциальные (параллельные) обмотки – на линейные напряжения U_{AC} и U_{BC} . Активная мощность нагрузки равна алгебраической сумме показаний двух ваттметров:

$$P = P_1 + P_2. \quad (152)$$

3.5.3. Коэффициент мощности и его технико-экономическое

значение. Компенсация реактивной мощности

На современных промышленных предприятиях широко распространены потребители электрической энергии, представляющие собой активно-индуктивную нагрузку, которые не только потребляют активную энергию из сети, но и загружают линию передачи реактивной энергией. К таким приемникам электроэнергии относятся асинхронные двигатели, трансформаторы, индукционные электронагревательные установки, люминесцентное освещение и т.д.

Отношение активной мощности к полной показывает, какая доля полной мощности потребляется нагрузкой, и называется коэффициентом мощности.

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}. \quad (153)$$

Таким образом, коэффициент мощности численно равен $\cos \varphi$.

В качестве примера на рис. 51 показана зависимость силы тока от $\cos \varphi$.

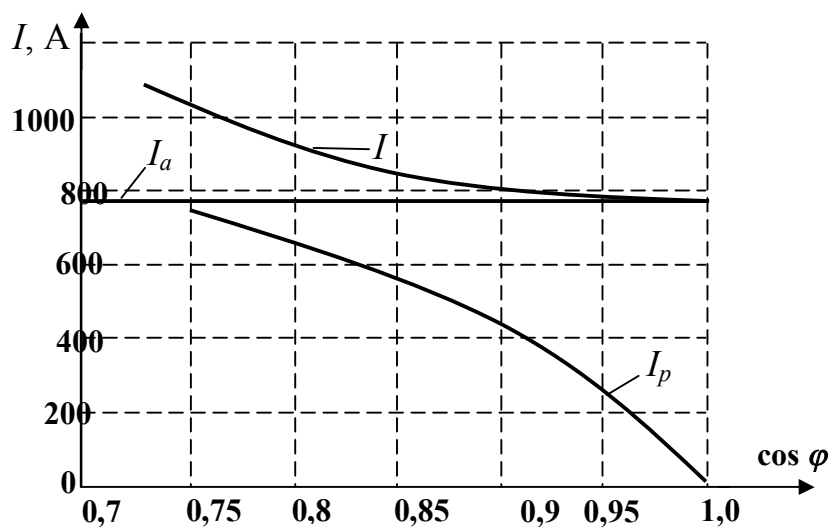


Рис. 51. Зависимость силы тока от $\cos \varphi$ при напряжении сети $U=380$ В и $P=500$ кВт

Из графика видно, что при снижении коэффициента мощности возрастает реактивная составляющая тока, а следовательно, возрастает общий ток линии.

Генераторы, питающие потребители, рассчитывают на определенную номинальную мощность:

$$S_n = \sqrt{3} U_n I_n. \quad (154)$$

При заданном напряжении U_n генератор может быть нагружен током, не превышающим номинальное значение I_n (U_n и I_n – соответственно линейные значения напряжения и тока). Поэтому увеличение тока потребителя вследствие снижения его $\cos \varphi$ не должно превышать определенных пределов.

Чтобы ток генератора не был выше номинального при снижении $\cos \varphi$ потребителя, необходимо снижать его активную мощность. В этом случае генератор будет полностью загружен по току и недогружен по активной мощности. Недогрузка генератора активной мощностью влечет за собой снижение КПД всей энергетической установки. Себестоимость электроэнергии от этого повышается.

Важным технико-экономическим показателем является и коэффициент реактивной мощности:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P}. \quad (155)$$

Коэффициент $\operatorname{tg} \varphi$ наглядно выражает реактивную мощность в долях от активной мощности. Связь между коэффициентом мощности и коэффициентом реактивной мощности выражается следующей зависимостью:

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}}. \quad (156)$$

Коэффициент мощности является недостаточным показателем для оценки реактивной составляющей нагрузки, особенно при высоких значениях коэффициента мощности, что видно из зависимостей реактивной мощности Q от коэффициента мощности $\cos \varphi$ и коэффициента реактивной мощности $\operatorname{tg} \varphi$, приведенных в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициент мощности	$\cos \varphi$	1,0	0,98	0,96	0,94	0,92	0,90
Коэффициент реактивной мощности	$\operatorname{tg} \varphi$	0	0,20	0,29	0,36	0,43	0,48
Реактивная мощность в % от активной	$\frac{Q}{P}$	0	20	29	36	43	48

Из таблицы видно, что при достаточно высоком значении $\cos \varphi = 0,96$ реактивная нагрузка составляет 29% от активной. Поэтому более показательным является коэффициент реактивной мощности $\operatorname{tg} \varphi$, выражающий непосредственное значение реактивной мощности в долях от

активной.

Чтобы повысить экономичность энергетических установок, принимают меры для уменьшения реактивной мощности в линии электропередачи. Коэффициент мощности при этом возрастает.

Повышения коэффициента мощности промышленного предприятия можно достигнуть лишь правильным сочетанием направленных на это мероприятий, каждое из которых должно быть технически и экономически обосновано. Мероприятия по повышению коэффициента мощности можно разделить на следующие группы:

- 1) уменьшение потребления реактивной мощности приемниками электрической энергии без применения компенсирующих устройств;
- 2) применение компенсирующих устройств.

К первой группе мероприятий относятся:

- а) упорядочение технологического процесса, ведущее к улучшению энергетического режима оборудования;
- б) замена малозагруженных асинхронных двигателей двигателями меньшей мощности;
- в) понижение напряжения питания асинхронных двигателей, систематически работающих с малой нагрузкой;
- г) ограничение режимов холостого хода двигателей и трансформаторов;
- д) повышение качества ремонта двигателей;
- е) замена малозагруженных трансформаторов трансформаторами меньшей мощности.

Правильный выбор мощности асинхронных двигателей и трансформаторов, их качественный ремонт и эксплуатация дают возможность понизить коэффициент реактивной мощности до 0,75 и повысить коэффициент мощности до 0,80.

Однако понижение коэффициента реактивной мощности естественным способом в большинстве случаев не позволяет понизить его до величины, требуемой энергоснабжающими организациями (0,4–0,3). Тогда прибегают к искусственным способам понижения коэффициента реактивной мощности при помощи компенсирующих устройств.

Для компенсации реактивной мощности, потребляемой электроустановками промышленного предприятия, могут быть применены синхронные компенсаторы и статические конденсаторы.

Рассмотрим способ компенсации реактивной мощности статическими конденсаторами. На рис. 52 показаны асинхронные двигатели, являющиеся приемниками электрической энергии, и эквивалентная схема одной фазы, в которой обмотка статора асинхронного двигателя представлена активным и индуктивным сопротивлениями. В качестве компенсирующего устройства включены конденсаторы.

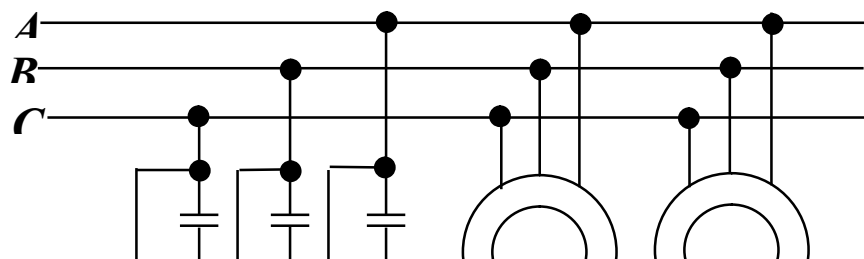


Рис. 52. Схема включения конденсаторов в качестве компенсаторов реактивной мощности при активно-индуктивной нагрузке (обмотки статора асинхронных двигателей) и эквивалентная схема одной фазы

Активная мощность одной фазы приемника электроэнергии при заданном напряжении определяется активной составляющей тока I_a :

$$P = U_{\phi} I \cos \varphi = U I_a. \quad (157)$$

При заданном значении активной мощности активная составляющая тока должна оставаться неизменной. Наличие реактивной (индуктивной) составляющей тока приводит к увеличению фактического значения тока нагрузки и, как следствие, к увеличению потерь мощности. Снизить ток нагрузки можно только за счет уменьшения реактивной составляющей тока приемника.

Последнее можно осуществить путем параллельного подключения приемника с емкостным элементом. Все сказанное наглядно иллюстрируется векторной диаграммой (рис. 53).

Таким образом, с введением компенсирующего устройства уменьшается реактивная составляющая тока, а следовательно, уменьшаются полный ток I' цепи и угол сдвига по фазе между напряжением и полным током цепи.

При определении емкости конденсаторов, необходимых для понижения коэффициента реактивной мощности $\operatorname{tg} \varphi$ сети до определенного значения, исходят из того, что реактивная мощность батареи конденсаторов должна компенсировать соответствующую часть реактивной мощности сети. В этом случае реактивную мощность конденсаторов можно определить через активную мощность P и значения коэффициентов реактивной мощности до установки статических конденсаторов $\operatorname{tg} \varphi_1$ и после их

установки $\operatorname{tg} \varphi_2$:

$$Q_C = P(\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2). \quad (158)$$

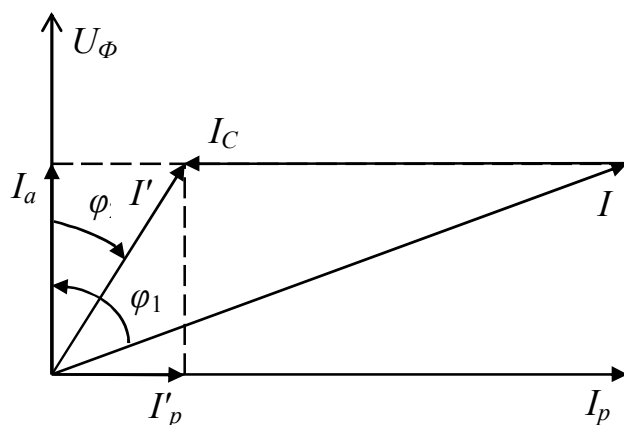


Рис. 53. Векторная диаграмма, иллюстрирующая компенсацию индуктивной составляющей тока включением емкостного элемента

Величина емкости батареи конденсаторов для одной фазы определяется по формуле

$$C = \frac{10^6 Q_C}{3\omega U^2}, \quad (159)$$

где U – линейное напряжение сети, В; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота питающего напряжения; Q_C – реактивная мощность конденсаторов; 3 – число фаз.

Обычно при помощи батареи конденсаторов компенсацию угла сдвига фаз осуществляют не полностью, понижая коэффициент реактивной мощности до 0,4–0,3 (коэффициент мощности повышается до 0,90–0,95). Еще большее понижение коэффициента реактивной мощности требует больших затрат на установку батарей конденсаторов, которые в этом случае экономически не оправдываются.

3.6. Пример расчета трехфазной цепи

Имеется трехфазная четырехпроводная электрическая цепь с нагрузкой, соединенной «звездой» (рис. 54).

Дано: $U_{\text{Л}}=380$ В; $R_A=6$ Ом; $R_B=8$ Ом; $R_C=10$ Ом; $X_A=8$ Ом; $X_B=6$ Ом.

Определить: фазные и линейные токи; активную, реактивную и полную мощности. Построить векторную диаграмму.

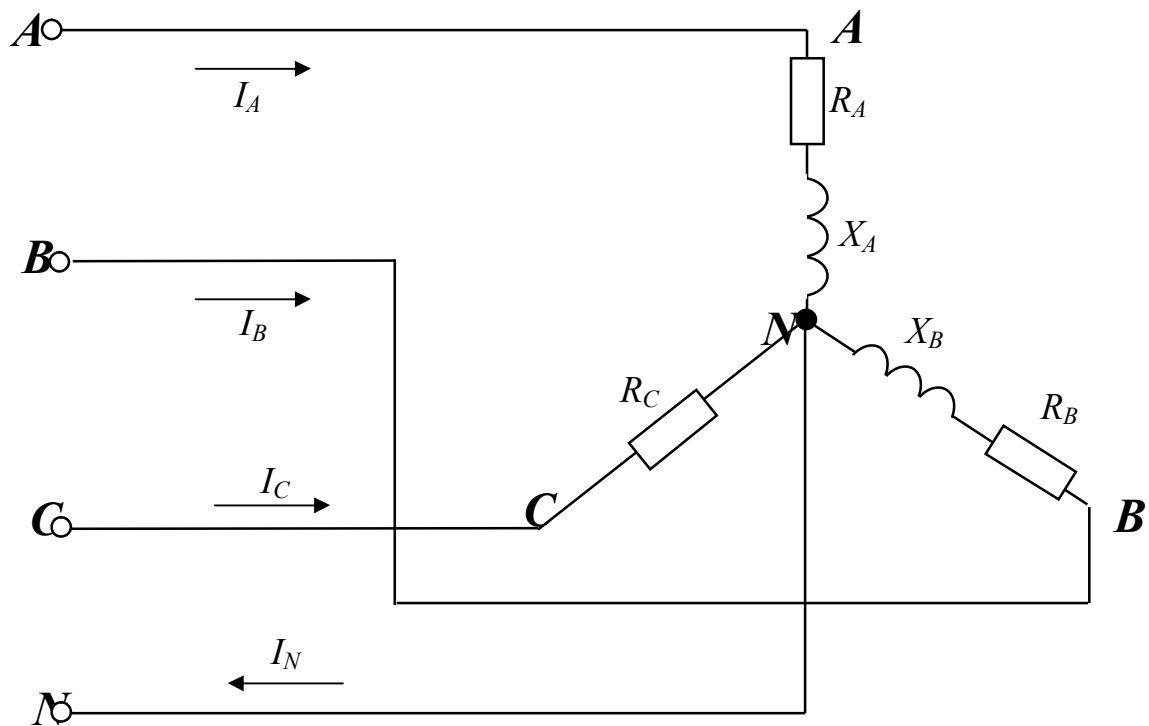


Рис. 54. Трехфазная четырехпроводная электрическая цепь при соединении нагрузки «звездой»

Решение.

Из приведенной схемы видно, что нагрузка является несимметричной.

1. Полное сопротивление каждой фазы:

$$Z_A = \sqrt{R_A^2 + X_A^2} = \sqrt{6^2 + 8^2} = 10 \text{ Ом};$$

$$Z_B = \sqrt{R_B^2 + X_B^2} = \sqrt{8^2 + 6^2} = 10 \text{ Ом};$$

$$Z_C = \sqrt{R_C^2 + X_C^2} = \sqrt{10^2 + 0^2} = 10 \text{ Ом}.$$

2. Фазное напряжение

$$U_\phi = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В}.$$

3. Фазные токи:

$$I_A = \frac{U_\phi}{Z_A} = \frac{220}{10} = 22 \text{ А}; \quad I_B = \frac{U_\phi}{Z_B} = \frac{220}{10} = 22 \text{ А}; \quad I_C = \frac{U_\phi}{Z_C} = \frac{220}{10} = 22 \text{ А}.$$

4. Углы сдвига по фазе между фазным напряжением и фазным током:

$$\varphi_A = \arccos \frac{R_A}{Z_A} = \arccos \frac{6}{10} = \arccos 0,6 = 53^\circ;$$

$$\varphi_B = \arccos \frac{R_B}{Z_B} = \arccos \frac{8}{10} = \arccos 0,8 = 37^\circ;$$

$$\varphi_C = \arccos \frac{R_C}{Z_C} = \arccos \frac{10}{10} = \arccos 1 = 0^\circ.$$

5. Активная мощность трехфазной цепи:

$$P_A = I_A U_A \cos \varphi_A = 22 \cdot 220 \cdot 0,6 = 2904 \text{ Вт};$$

$$P_B = I_B U_B \cos \varphi_B = 22 \cdot 220 \cdot 0,8 = 3872 \text{ Вт};$$

$$P_C = I_C U_C \cos \varphi_C = 22 \cdot 220 \cdot 1 = 4840 \text{ Вт};$$

$$P = P_A + P_B + P_C = 2904 + 3872 + 4840 = 11616 \text{ Вт} = 11,6 \text{ кВт}.$$

6. Реактивная мощность трехфазной цепи:

$$Q_A = I_A U_A \sin \varphi_A = I_A U_A \frac{X_A}{Z_A} = 22 \cdot 220 \cdot 0,8 = 3872 \text{ ВАр};$$

$$Q_B = I_B U_B \sin \varphi_B = I_B U_B \frac{X_B}{Z_B} = 22 \cdot 220 \cdot 0,6 = 2904 \text{ ВАр};$$

$$Q_C = I_C U_C \sin \varphi_C = I_C U_C \frac{X_C}{Z_C} = 22 \cdot 220 \cdot 0 = 0;$$

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C = 3872 + 2904 + 0 = 6776 \text{ ВАр} = 6,8 \text{ кВАр}.$$

7. Полная мощность трехфазной цепи

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{11,6^2 + 6,8^2} = \sqrt{180,8} = 13,4 \text{ кВА}.$$

Построение векторной диаграммы (рис. 55) следует начинать с векторов фазных напряжений, которые располагаются под углом 120° друг к другу. Концы этих векторов являются вершинами равностороннего треугольника, сторонами которого будут векторы линейных напряжений.

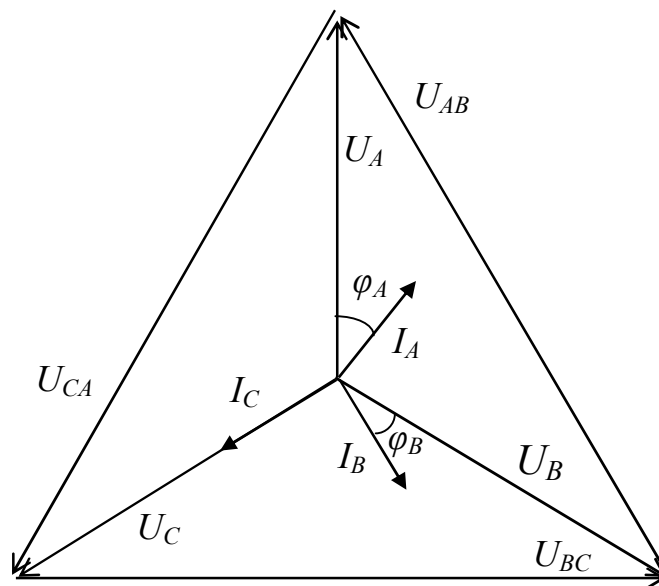


Рис. 55. Векторная диаграмма для трехфазной четырехпроводной схемы

при соединении нагрузки «звездой»

В фазах A и B включена активно-индуктивная нагрузка. Векторы фазных токов I_A и I_B отстают от векторов фазных напряжений на углы φ_A и φ_B соответственно. В фазе C нагрузка активная, следовательно, фазный ток и фазное напряжение совпадают по фазе.

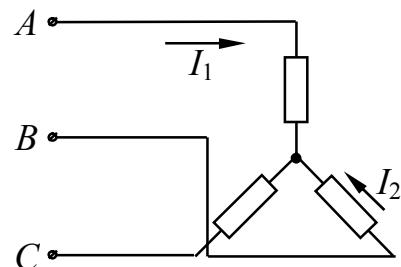
Контрольные вопросы по трехфазным электрическим цепям переменного тока

1. Лампы накаливания с номинальным напряжением $U_H=220$ В включают в трехфазную сеть с линейным напряжением $U_L=380$ В. Определить схему соединения ламп.

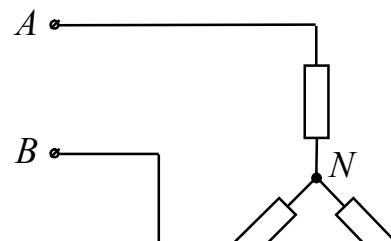
- 1) «звездой» без нейтрального провода;
- 2) «звездой» с нейтральным проводом;
- 3) «треугольником»;
- 4) лампы нельзя включить в сеть.

2. Какой из токов линейный, а какой фазный?

- 1) I_1, I_2 – линейные токи;
- 2) I_1, I_2 – фазные токи;
- 3) I_1 – фазный ток, I_2 – линейный ток;
- 4) I_1 – линейный ток, I_2 – фазный ток



3. Между какими точками приведенной схемы измеряются линейное и фазное напряжения?



- 1) напряжение U_{AN} – линейное, а напряжение U_{BN} – фазное;
- 2) напряжение U_{AB} – линейное, а напряжение U_{BC} – фазное;
- 3) напряжение U_{CA} – линейное, а напряжение U_{CN} – фазное.

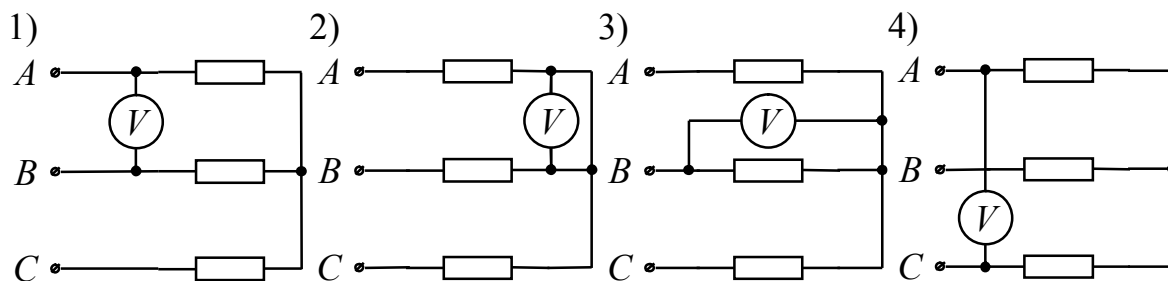
4. В трехфазную сеть с линейным напряжением $U_L=380$ В надо включить асинхронный двигатель, обмотки которого рассчитаны на напряжение 220 В. Как следует соединить обмотки двигателя?

- 1) «звездой»; 2) «треугольником»; 3) включить нельзя.

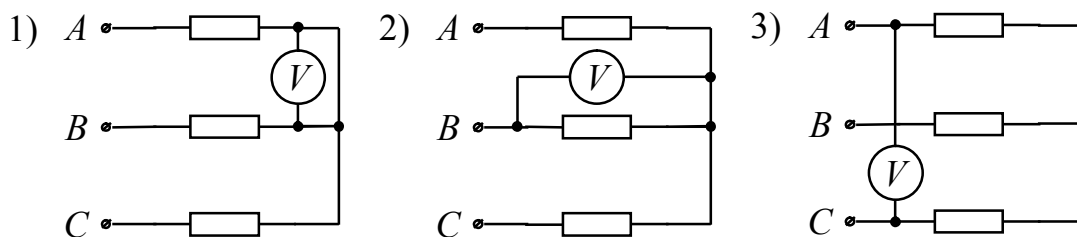
5. Фазное напряжение генератора при системе «звезда» с нейтральным проводом равно 127 В. Какие приемники энергии можно подключить к генератору?

- 1) с номинальным напряжением 127 В;
- 2) с номинальным напряжением 220 В;
- 3) с номинальным напряжением 127 и 220 В.

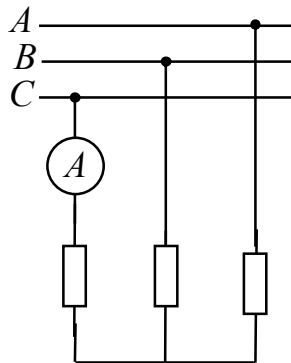
6. Указать правильную схему подключения вольтметра к трехфазной нагрузке с целью измерения фазного напряжения.



7. Указать правильную схему подключения вольтметра к трехфазной нагрузке с целью измерения линейного напряжения.



8. Сопротивление фазы симметричного трехфазного приемника равно 22 Ом. Линейное напряжение $U_{\text{Л}}=380$ В. Что покажет амперметр, включенный в данную цепь?



- 1) 3 А;
- 2) 10 А;
- 3) 20 А;
- 4) 14 А.

9. Что произойдет в трехфазной цепи, соединенной по схеме «звезда», при симметричной нагрузке в случае обрыва нейтрального провода?

- 1) фазные и линейные напряжения останутся неизменными;
- 2) перераспределение фазных напряжений;
- 3) перераспределение линейных напряжений.

10. Что произойдет в трехфазной цепи, соединенной по схеме «звезда», при несимметричной нагрузке в случае обрыва нейтрального провода?

- 1) перераспределение фазных напряжений;
- 2) фазные и линейные напряжения не изменятся;
- 3) перераспределение линейных напряжений.

11. Может ли нейтральный провод в четырехпроводной трехфазной цепи обеспечить симметрию фазных напряжений при несимметричной нагрузке?

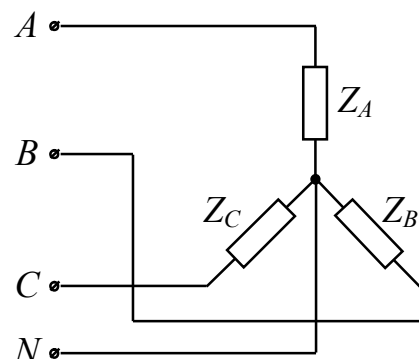
- 1) может, если обладает пренебрежимо малым сопротивлением;
- 2) не может;
- 3) может, если нагрузка чисто активная.

12. Три активных сопротивления: $R_A=110$ Ом, $R_B=220$ Ом, $R_C=220$ Ом соединены «звездой» и включены в трехфазную сеть с линейным напряжением $U_{\text{Л}}=380$ В. Определить линейные токи I_A , I_B , I_C при наличии нейтрального провода.

- 1) $I_A=1$ А; $I_B=I_C=1$ А;
- 2) $I_A=4$ А; $I_B=I_C=1$ А;
- 3) $I_A=2$ А; $I_B=I_C=1$ А.

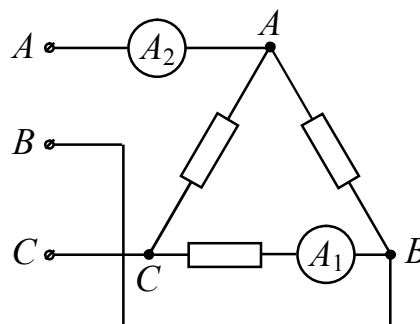
13. Будут ли меняться линейные токи при обрыве нейтрального провода в случае симметричной нагрузки?

- 1) будут;
- 2) не будут.



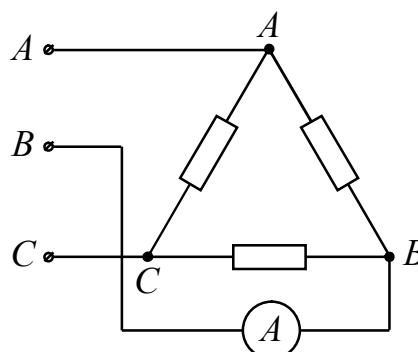
14. В симметричной трехфазной цепи показания амперметра A_2 составляют 38 А. Чему равно показание амперметра A_1 ?

- 1) 22 А;
- 2) 38 А;
- 3) 44 А;
- 4) 50 А.

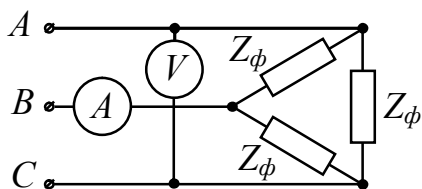


15. Сопротивление фазы симметричного трехфазного приемника равно 10 Ом. Линейное напряжение 220 В. Что покажет амперметр?

- 1) 38 А;
- 2) 50 А;
- 3) 10 А;
- 4) 30 А.

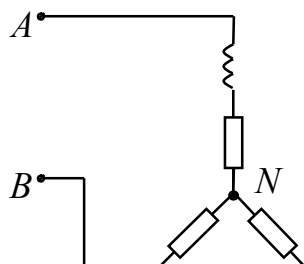


16. Сопротивление фазы трехфазного приемника равно 10 Ом ($Z_\phi=10$ Ом). Что покажет вольтметр, если амперметр показывает 17,3 А?



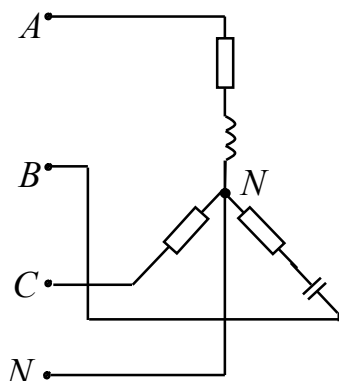
- 1) 50 В;
- 2) 73 В;
- 3) 300 В;
- 4) 100 В;
- 5) 173 В.

17. Какое из приведенных уравнений соответствует определению активной мощности для трехфазной цепи при условии симметричной нагрузки?



- 1) $Q=3 \cdot I_\phi \cdot U_\phi \cdot \sin \varphi$;
- 2) $P=\sqrt{3} \cdot I_L \cdot U_L \cdot \cos \varphi$;
- 3) $P=3 \cdot I \cdot U$;
- 4) $S=I_\phi \cdot U_\phi$.

18. Какое из приведенных уравнений соответствует определению активной мощности для трехфазной цепи при условии несимметричной нагрузки?



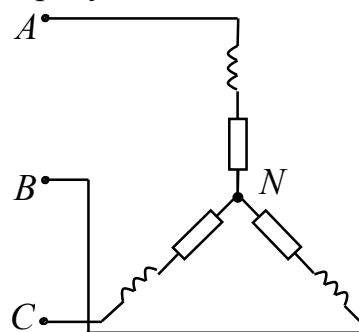
- 1) $P = 3 \cdot I_{\phi} \cdot U_{\phi} \cdot \cos \varphi$;
- 2) $P = \sqrt{3} \cdot I_L \cdot U_L \cdot \cos \varphi$;
- 3) $Q = 3 \cdot I_{\phi} \cdot U_{\phi} \cdot \sin \varphi$;
- 4) $P = P_A + P_B + P_C$;
- 5) $Q = Q_A + Q_B + Q_C$.

19. Укажите способ повышения коэффициента мощности приемника в цепи переменного тока:

- 1) последовательно с приемником включить индуктивную катушку;
- 2) параллельно приемнику включить индуктивную катушку;
- 3) параллельно приемнику включить конденсатор;
- 4) нет правильного ответа.

20. Какое из приведенных уравнений соответствует определению реактивной мощности для трехфазной цепи при условии несимметричной нагрузки?

- 1) $Q = 3 \cdot I_{\phi} \cdot U_{\phi} \cdot \sin \varphi$;
- 2) $Q = \sqrt{3} \cdot I_L \cdot U_L \cdot \sin \varphi$;
- 3) $P = 3 \cdot I_{\phi} \cdot U_{\phi} \cdot \cos \varphi$;
- 4) $Q = Q_A + Q_B + Q_C$;
- 5) $P = P_A + P_B + P_C$.



21. К симметричной нагрузке, соединенной «треугольником», приложено линейное напряжение $U_L=220$ В, линейный ток $I_L=5$ А.

Коэффициент мощности $\cos \varphi=0,8$. Найти активную мощность трехфазной цепи.

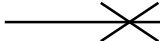
1) 1140 Вт; 2) 1100 Вт; 3) 1520 Вт; 4) исходных данных недостаточно для расчета.

22. Линейное напряжение трехфазной сети 380 В. Линейный ток 10 А, коэффициент мощности $\cos \varphi=0,75$. Найти активную мощность трехфазной цепи.

1) 4930 Вт; 2) 6200 Вт; 3) 3800 Вт; 4) 5750 Вт.

Задание на самостоятельную работу по цепям переменного тока
«Расчет трехфазной электрической цепи
при соединении нагрузки «звездой»

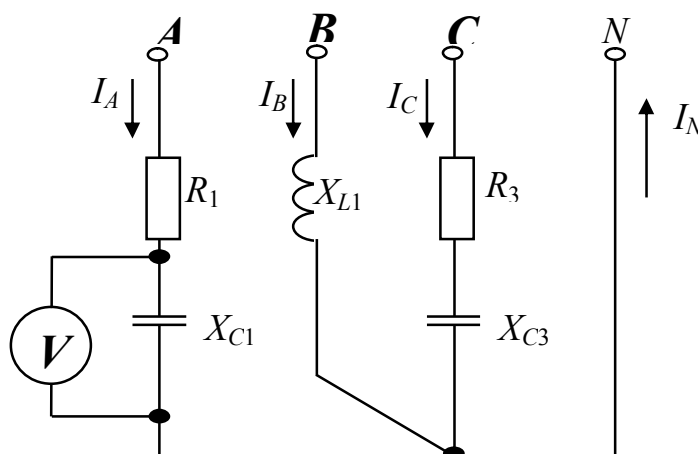
Система линейных напряжений всегда симметрична.

Условное обозначение на схемах:  обрыв провода

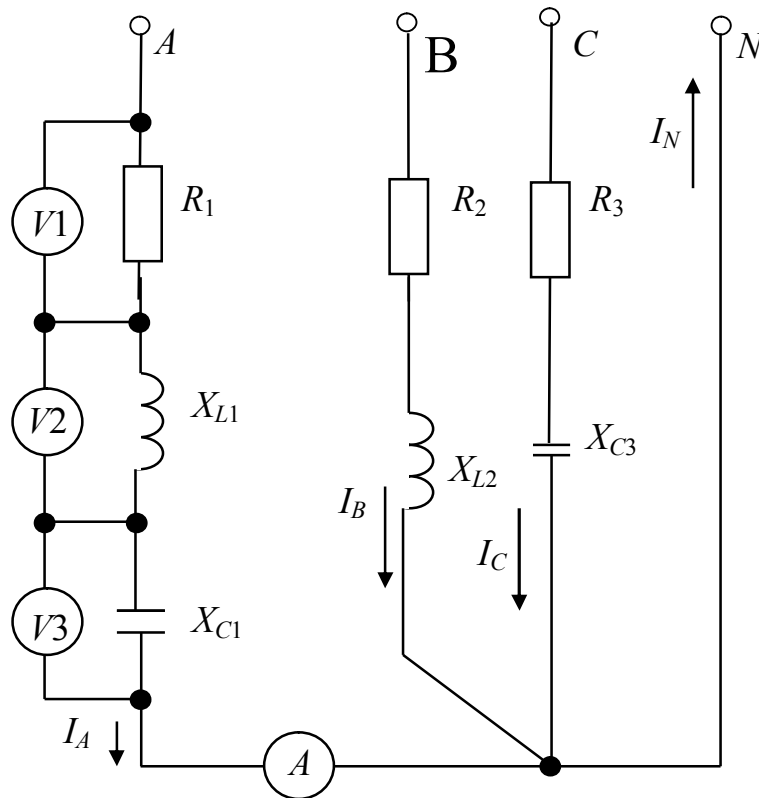
Вариант 1

Дано: $R_1=5 \text{ Ом}$; $R_3=5\sqrt{3} \text{ Ом}$; $X_{L1}=7\frac{1}{7} \text{ Ом}$; $X_{C1}=5\sqrt{3} \text{ Ом}$; $X_{C3}=5 \text{ Ом}$; показания вольтметра V составляют $25\sqrt{3} \text{ В}$.

Определить все токи, линейные и фазные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.



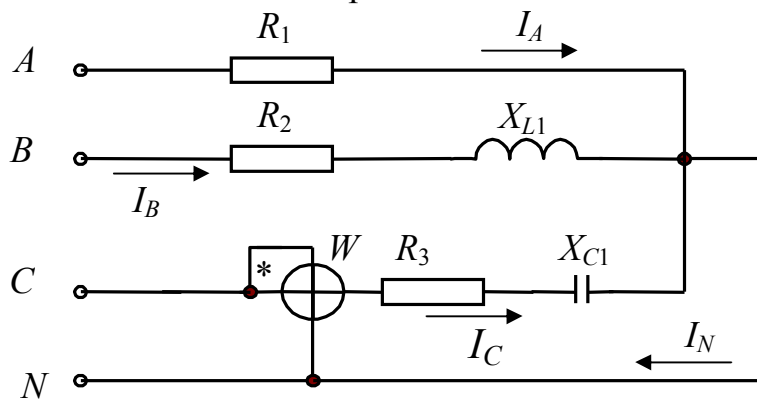
Вариант 2



Дано: $R_2=R_3=X_{L1}=10 \text{ Ом}$; $X_{L2}=X_{C3}=10\sqrt{3} \text{ Ом}$; показания вольтметров $V1$, $V2$ и $V3$ одинаковы; показания амперметра A составляют 10 А .

Определить R_1 , X_{C1} , все токи, линейные и фазные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

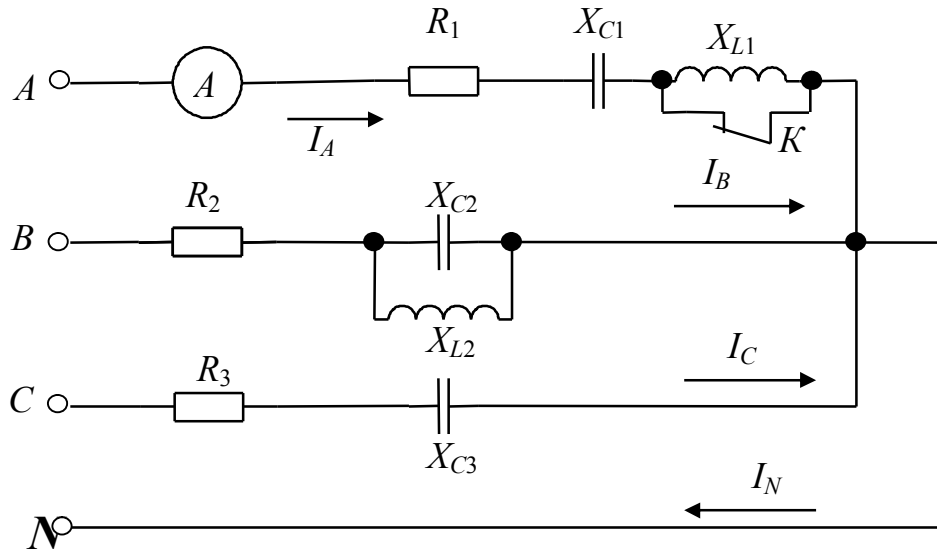
Вариант 3



Дано: $R_1=20 \text{ Ом}$; $R_2=R_3=10 \text{ Ом}$; $X_{L1}=X_{C1}=10\sqrt{3} \text{ Ом}$; показания ваттметра W составляют 360 Вт .

Определить все токи, фазные и линейные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

Вариант 4

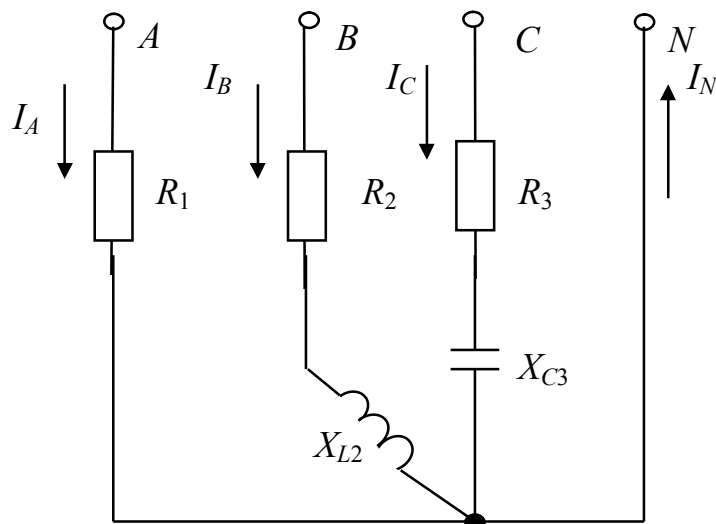


Дано: $R_1=R_2=R_3=15 \text{ Ом}$; $X_{L2}=20 \text{ Ом}$; $X_{C1}=X_{C3}=20 \text{ Ом}$; $X_{C2}=10 \text{ Ом}$;
 $U_{\text{Л}}=200\sqrt{3} \text{ В}$.

Каким должно быть сопротивление X_{L1} , чтобы при размыкании ключа K показания амперметра A не изменились?

Определить все токи, фазные напряжения, активную, реактивную, полную мощности при замкнутом ключе K . Построить векторную диаграмму при замкнутом ключе K .

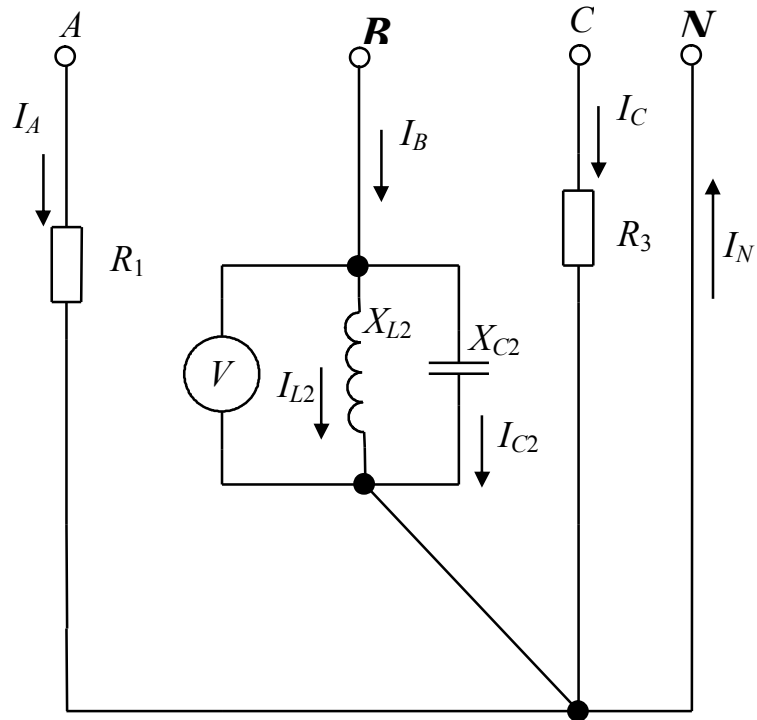
Вариант 5



Дано: $R_1=40 \text{ Ом}$; $R_2=R_3=20 \text{ Ом}$; $X_{L2}=X_{C3}=20\sqrt{3} \text{ Ом}$; $U_{\text{Л}}=40\sqrt{3} \text{ В}$.

Определить все токи, фазные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

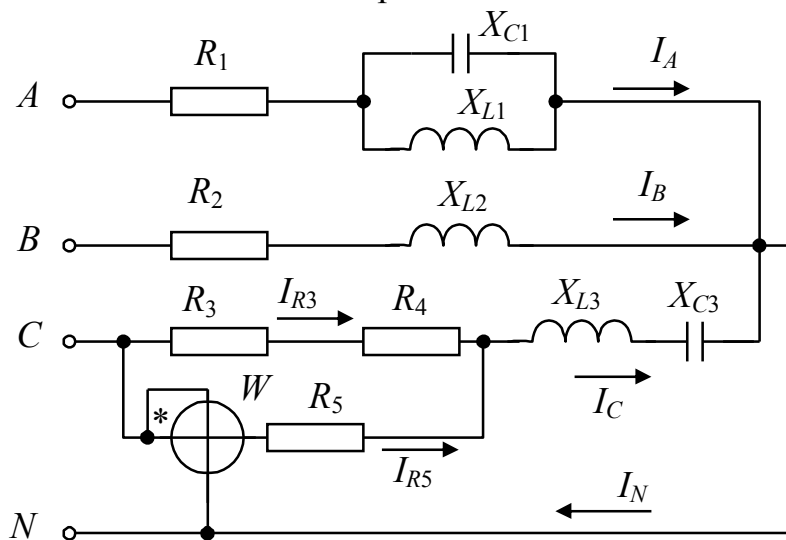
Вариант 6



Дано: $R_1=R_3=100 \text{ Ом}$; $X_{L2}=X_{C2}=50 \text{ Ом}$; $U_{\text{Л}}=300\sqrt{3} \text{ В}$.

Определить все токи, фазные напряжения, показания вольтметра V , активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

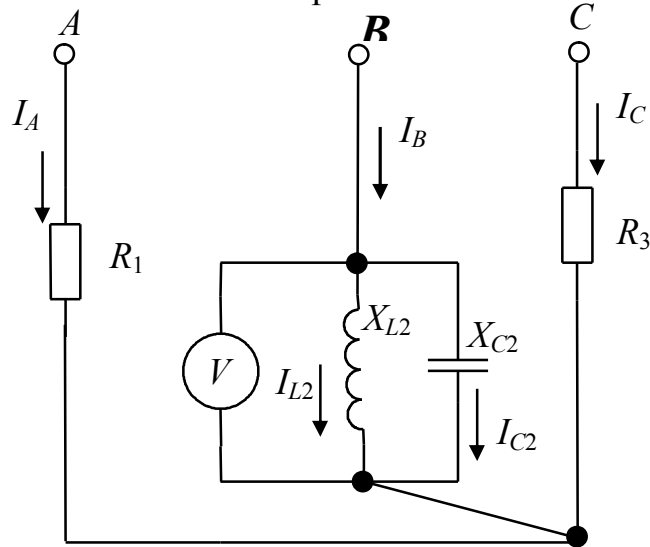
Вариант 7



Дано: $R_1=R_2=40\sqrt{3} \text{ Ом}$; $R_3=50\sqrt{3} \text{ Ом}$; $R_4=10\sqrt{3} \text{ Ом}$; $R_5=120\sqrt{3} \text{ Ом}$; $X_{L1}=20 \text{ Ом}$; $X_{L2}=40 \text{ Ом}$; $X_{L3}=90 \text{ Ом}$; $X_{C1}=40 \text{ Ом}$; $X_{C3}=50 \text{ Ом}$; $U_{\text{Л}}=400\sqrt{3} \text{ В}$.

Определить все токи, фазные напряжения, показания ваттметра W , активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

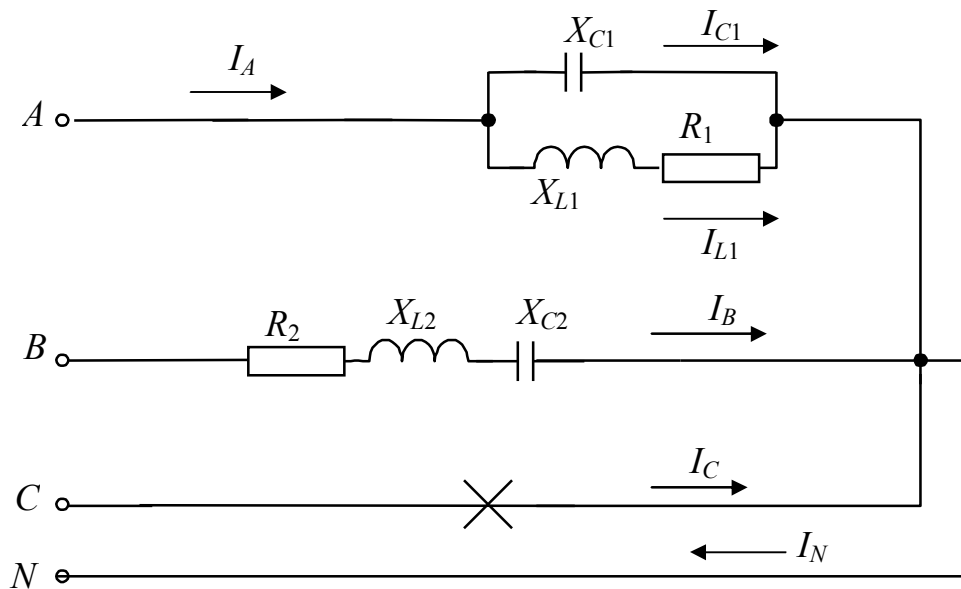
Вариант 8



Дано: $R_1=R_3=100 \text{ Ом}$; $X_{L2}=X_{C2}=25\sqrt{3} \text{ Ом}$, $U_{\text{Л}}=200 \text{ В}$.

Определить все токи, фазные напряжения, показания вольтметра V , активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

Вариант 9

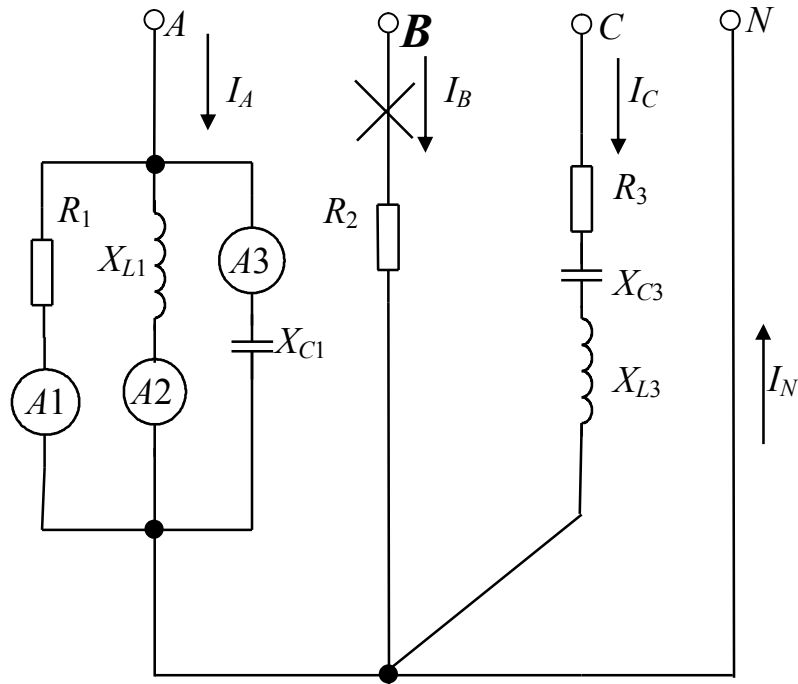


Дано: $R_1=20\sqrt{3} \text{ Ом}$; $R_2=\frac{80}{\sqrt{3}} \text{ Ом}$; $X_{L1}=20 \text{ Ом}$; $X_{L2}=\frac{80}{\sqrt{3}} \text{ Ом}$; $X_{C1}=80 \text{ Ом}$;

$X_{C2}=\frac{80}{\sqrt{3}} \text{ Ом}$; $U_{\text{Л}}=100 \text{ В}$; фаза C находится в обрыве.

Определить все токи, фазные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

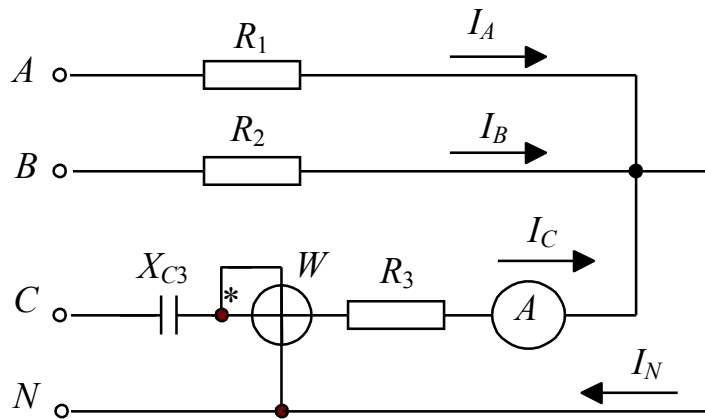
Вариант 10



Дано: $R_1=R_2=R_3=10 \text{ Ом}$; $X_{L3}=X_{C3}=20 \text{ Ом}$; $U_{\text{л}}=40\sqrt{3} \text{ В}$; показания амперметров $A1$, $A2$ и $A3$ одинаковы; фаза B находится в обрыве.

Определить X_{L1} , X_{C1} , показания амперметров, все токи, фазные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

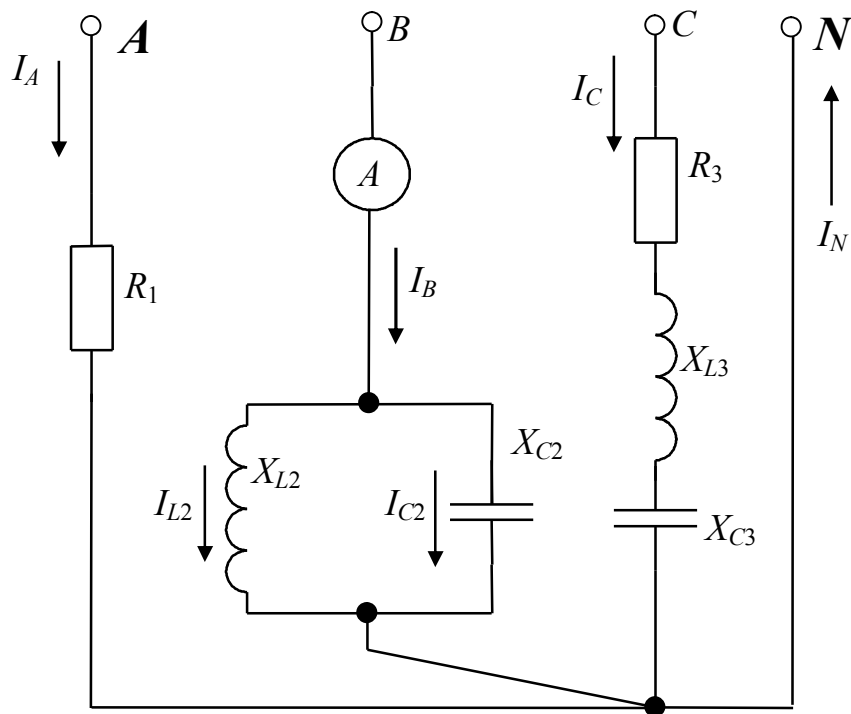
Вариант 11



Дано: $R_1=R_2=40 \text{ Ом}$; $R_3=10 \text{ Ом}$; $X_{C3}=10\sqrt{3} \text{ Ом}$; показания амперметра A составляют 4 А .

Определить все токи, показания ваттметра W , фазные и линейные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

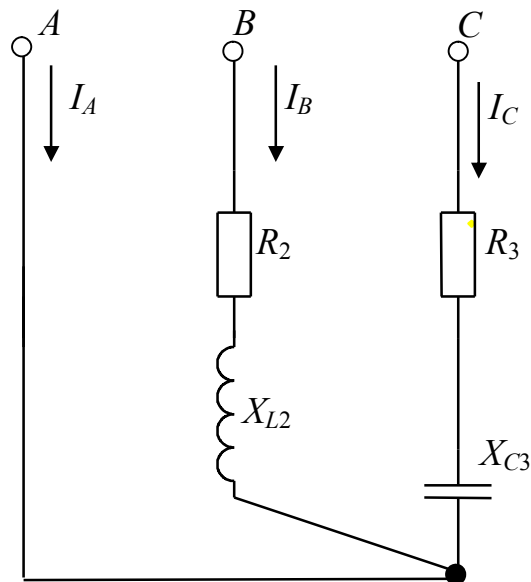
Вариант 12



Дано: $R_1=R_3=X_{L2}=100 \text{ Ом}$; $X_{L3}=X_{C3}=50 \text{ Ом}$; $U_{\text{Л}}=300\sqrt{3} \text{ В}$; показания амперметра A равны нулю.

Определить X_{C2} , все токи, фазные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

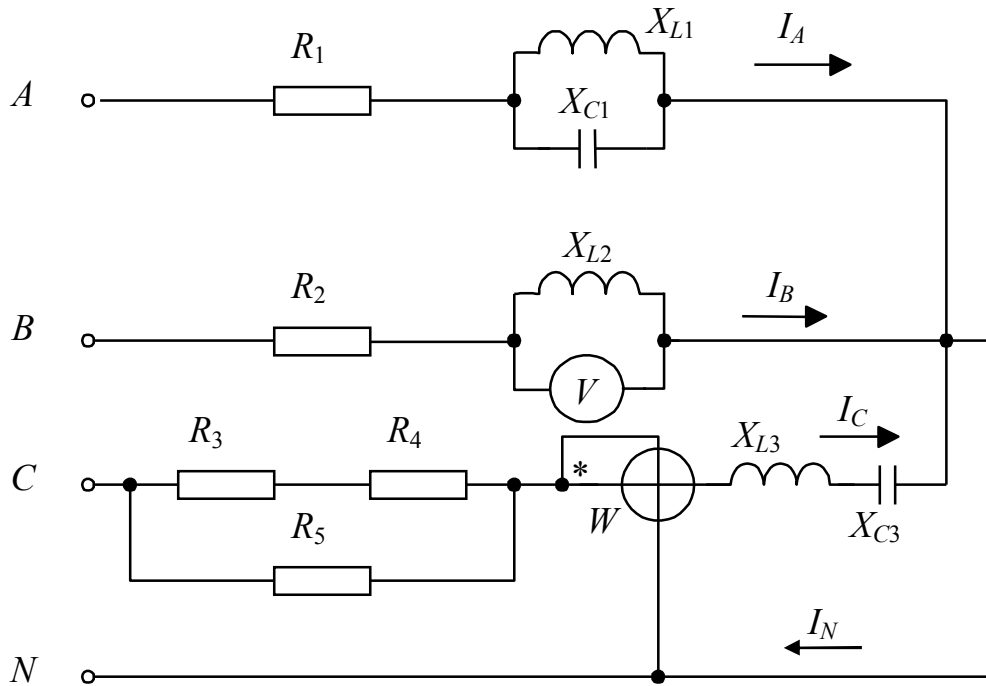
Вариант 13



Дано: $R_2=R_3=20 \text{ Ом}$; $X_{L2}=X_{C3}=20\sqrt{3} \text{ Ом}$; $U_{\text{Л}}=40 \text{ В}$.

Определить все токи, фазные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

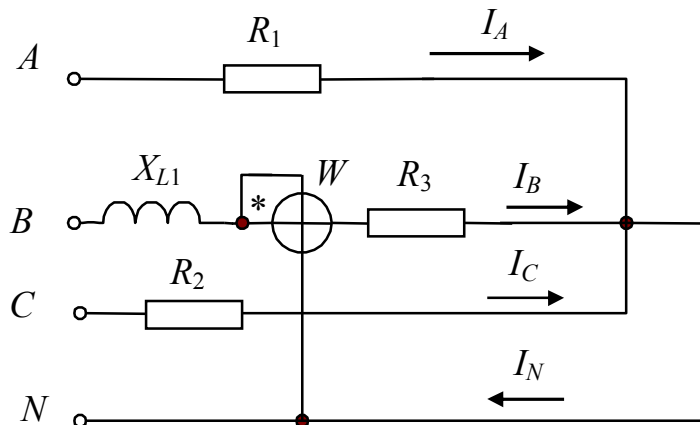
Вариант 14



Дано: $R_1=R_2=40\sqrt{3}$ Ом; $R_3=50\sqrt{3}$ Ом; $R_4=10\sqrt{3}$ Ом; $R_5=120\sqrt{3}$ Ом; $X_{L1}=20$ Ом; $X_{L2}=40$ Ом; $X_{L3}=90$ Ом; $X_{C1}=40$ Ом; $X_{C3}=50$ Ом; показания вольтметра V составляют 120 В.

Определить все токи, фазные и линейные напряжения, показания ваттметра W , активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

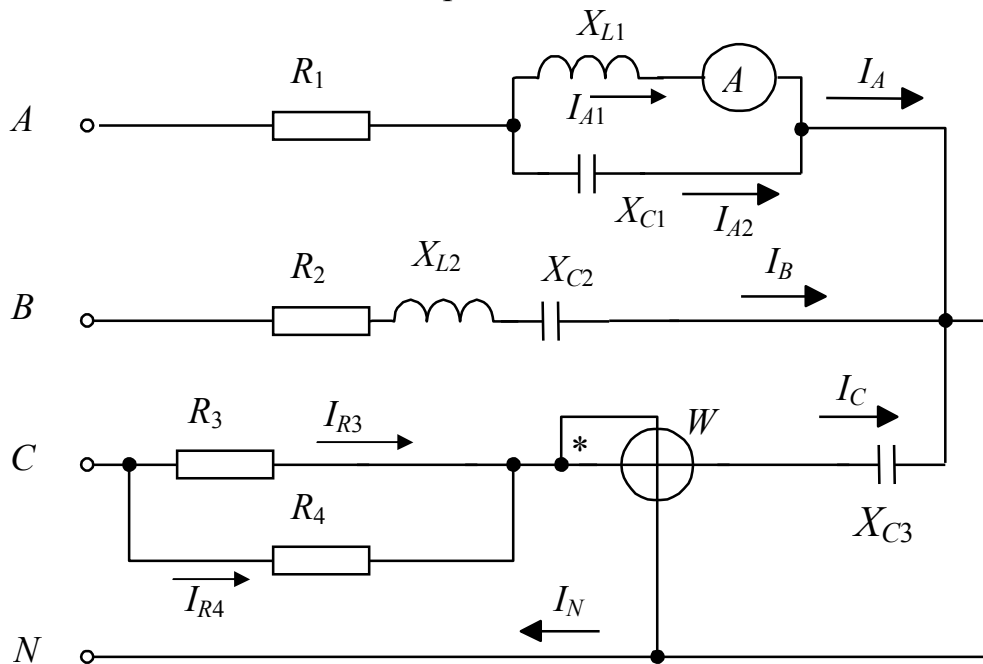
Вариант 15



Дано: $R_1=R_2=20$ Ом; $R_3=10$ Ом; $X_{L1}=10\sqrt{3}$ Ом; показания ваттметра W составляют 250 Вт.

Определить все токи, фазные и линейные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

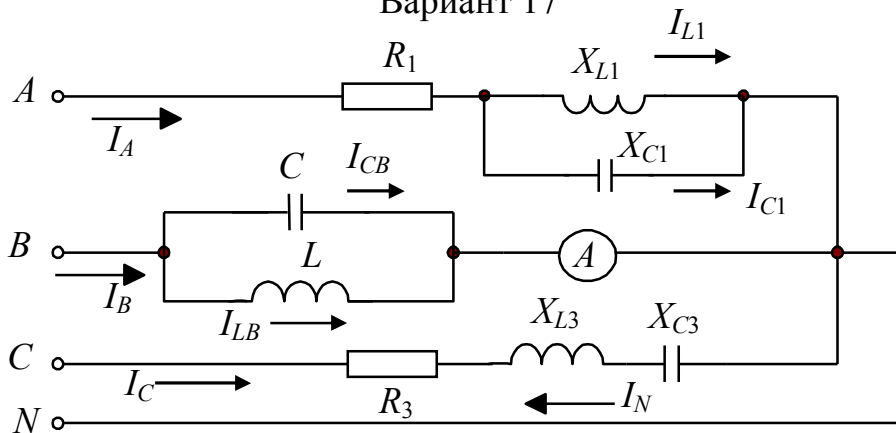
Вариант 16



Дано: $R_1=R_2=40\sqrt{3}$ Ом; $R_3=200\sqrt{3}$ Ом; $R_4=50\sqrt{3}$ Ом; $X_{L1}=40$ Ом; $X_{L2}=60$ Ом; $X_{C1}=20$ Ом; $X_{C2}=100$ Ом; $X_{C3}=40$ Ом; показания амперметра A составляют 2 А.

Определить все токи, фазные и линейные напряжения, показания ваттметра W , активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

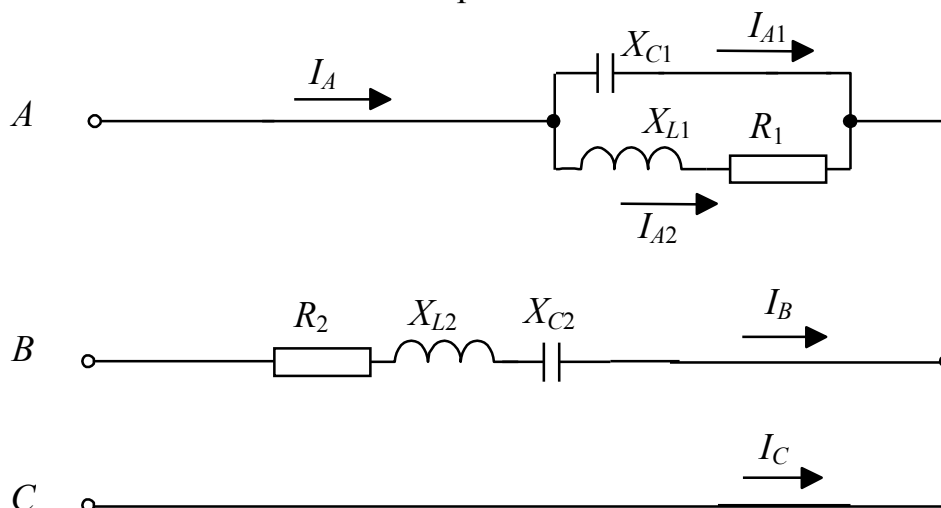
Вариант 17



Дано: $R_1=R_3=30\sqrt{3}$ Ом; $X_{L1}=30$ Ом; $X_{L3}=70$ Ом; $X_{C1}=15$ Ом; $X_{C3}=100$ Ом; $L=0,1$ мГн; $C=10^4$ мкФ; $U_{\text{л}}=300\sqrt{3}$ В; показания амперметра A равны нулю.

Определить частоту питающего напряжения f , все токи, фазные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

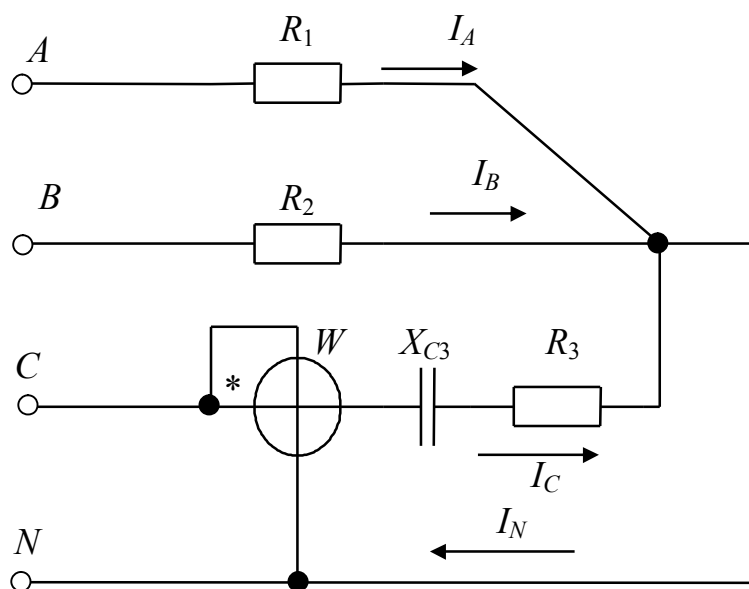
Вариант 18



Дано: $R_1 = 20\sqrt{3} \text{ Ом}$; $R_2 = \frac{80}{\sqrt{3}} \text{ Ом}$; $X_{L1} = 20 \text{ Ом}$; $X_{L2} = \frac{80}{\sqrt{3}} \text{ Ом}$; $X_{C1} = 80 \text{ Ом}$;
 $X_{C2} = \frac{80}{\sqrt{3}} \text{ Ом}$; $U_{\text{Л}} = 160 \text{ В}$.

Определить все токи, фазные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

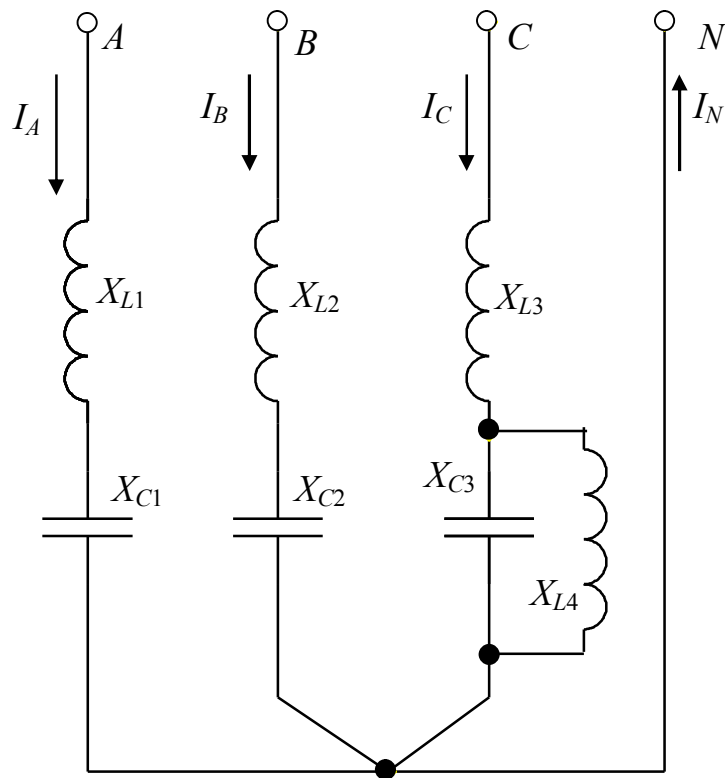
Вариант 19



Дано: $R_1 = R_2 = 20 \text{ Ом}$; $R_3 = 10 \text{ Ом}$; $X_{C3} = 10\sqrt{3} \text{ Ом}$; показания ваттметра W составляют 250 Вт .

Определить все токи, фазные и линейные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

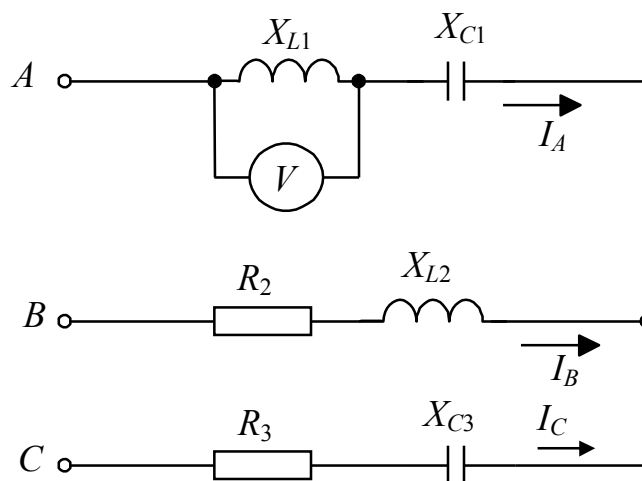
Вариант 20



Дано: $X_{L1}=50$ Ом; $X_{L3}=70$ Ом; $X_{L4}=170$ Ом; $X_{C1}=150$ Ом; $X_{C2}=200$ Ом; $U_{\text{л}}=150\sqrt{3}$ В; нагрузка симметрична.

Определить X_{L2} , X_{C3} , все токи, фазные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

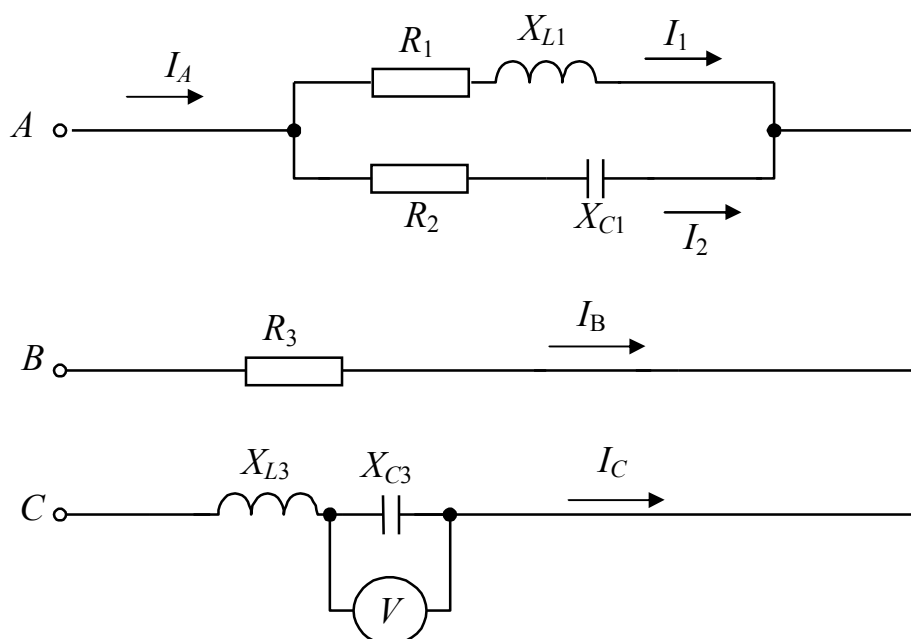
Вариант 21



Дано: $R_2=R_3=30\sqrt{3}$ Ом; $X_{L1}=X_{L2}=X_{C1}=X_{C3}=30$ Ом; показания вольтметра V составляют 60 В.

Определить все токи, фазные и линейные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

Вариант 22

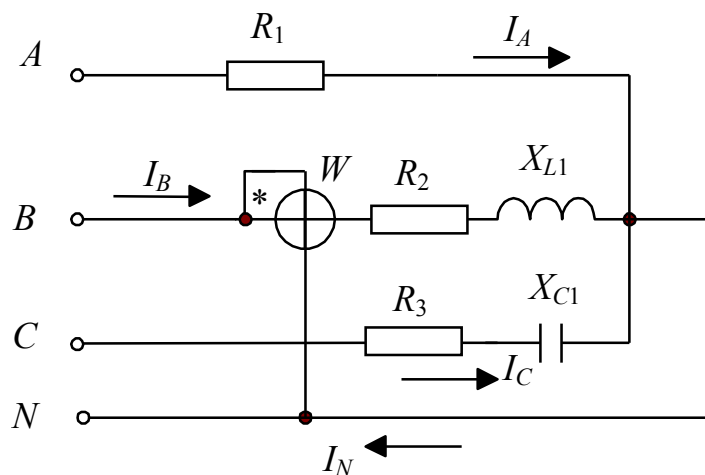


Дано: $R_1=R_2=40\sqrt{3}$ Ом; $R_3=\frac{80}{\sqrt{3}}$ Ом; $X_{L1}=40$ Ом; $X_{L3}=50$ Ом; $X_{C1}=40$ Ом;

$X_{C3}=50$ Ом; $U_{\text{Л}}=160$ В.

Определить все токи, фазные напряжения, показания вольтметра V , активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

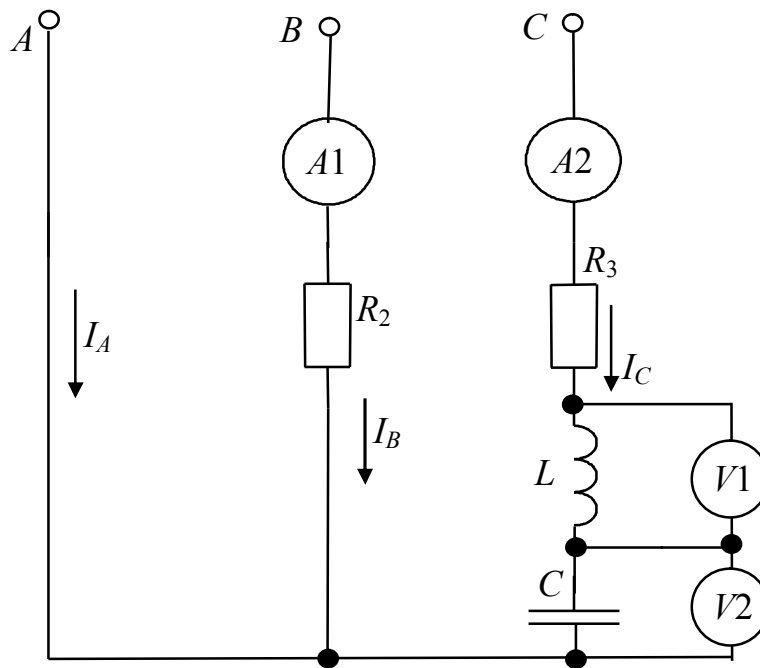
Вариант 23



Дано: $R_1=40$ Ом; $R_2=R_3=20$ Ом; $X_{L1}=X_{C1}=20\sqrt{3}$ Ом; показания ваттметра W составляют 320 Вт.

Определить все токи, фазные и линейные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

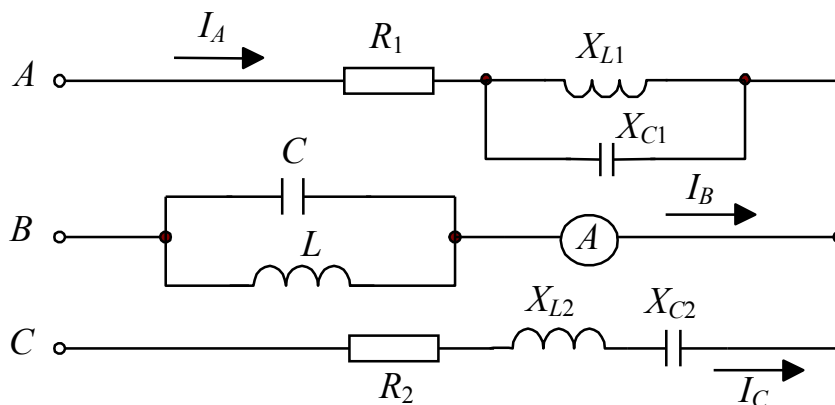
Вариант 24



Дано: $R_2=R_3=75 \text{ Ом}$; $C=\frac{1000}{\pi^2} \text{ мкФ}$; $U_{\text{Л}}=300 \text{ В}$; $f=50 \text{ Гц}$; показания амперметров $A1$ и $A2$ одинаковы.

Определить L , все токи, фазные напряжения, показания вольтметров $V1$ и $V2$, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

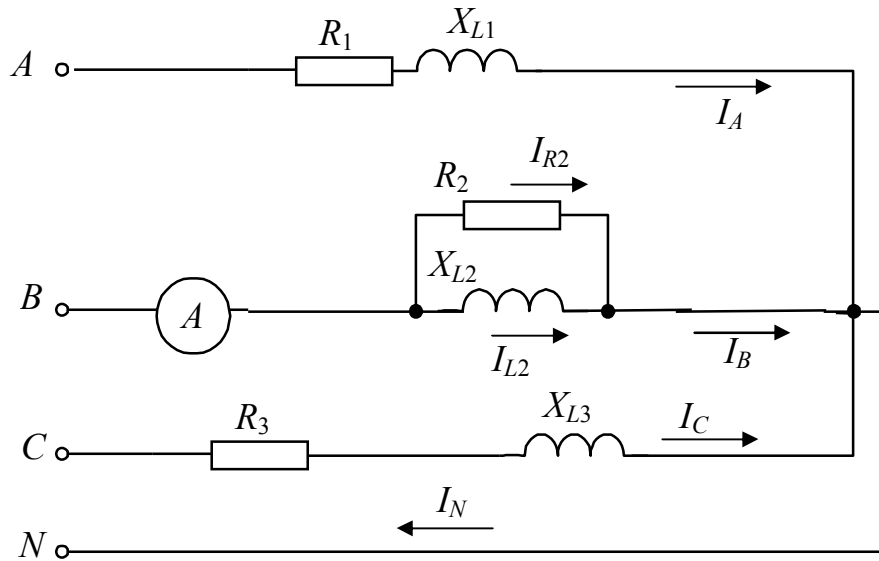
Вариант 25



Дано: $R_1=R_2=30\sqrt{3} \text{ Ом}$; $X_{L1}=15 \text{ Ом}$; $X_{L2}=100 \text{ Ом}$; $X_{C1}=30 \text{ Ом}$; $X_{C2}=70 \text{ Ом}$; $L=1 \text{ мГн}$; $C=0,1 \text{ мкФ}$; $U_{\text{Л}}=240 \text{ В}$; показания амперметра A равны нулю.

Определить частоту питающего напряжения f , все токи, фазные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

Вариант 26



Дано: $R_1=R_3=10\sqrt{3}$ Ом; $R_2=\frac{40}{\sqrt{3}}$ Ом; $X_{L1}=X_{L3}=10$ Ом; $X_{L2}=40$ Ом;

показания амперметра A составляют 3 А.

Определить все токи, фазные и линейные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

Задание на самостоятельную работу по цепям переменного тока «Расчет трехфазной электрической цепи при соединении нагрузки «треугольником»

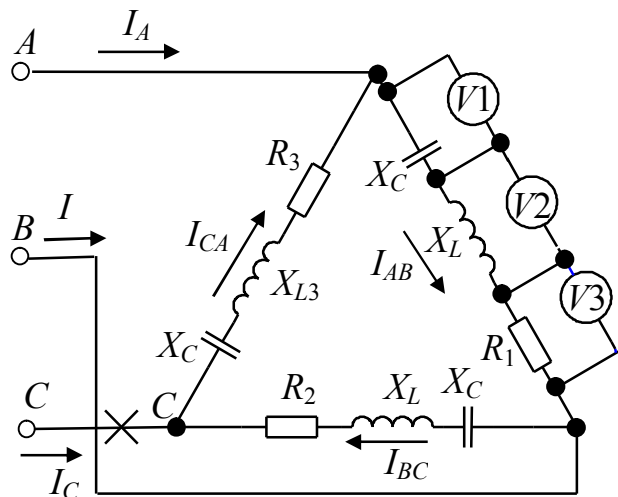
Система линейных напряжений всегда симметрична.

Условное обозначение на схемах: обрыв провода

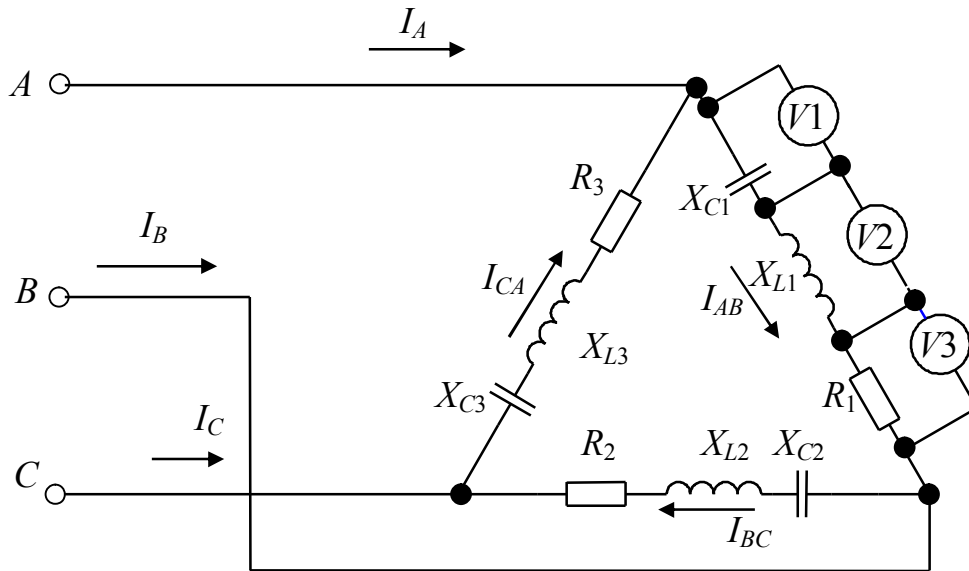
Вариант 1

Дано: $R_1=R_2=R_3$; $X_{L1}=X_{L2}=X_{L3}$; $X_{C1}=X_{C2}=X_{C3}=10$ Ом; линейный провод C находится в обрыве; показания вольтметров $V1$, $V2$ и $V3$ одинаковы и составляют 100 В.

Определить R_1 , X_{L1} все токи, линейные и фазные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.



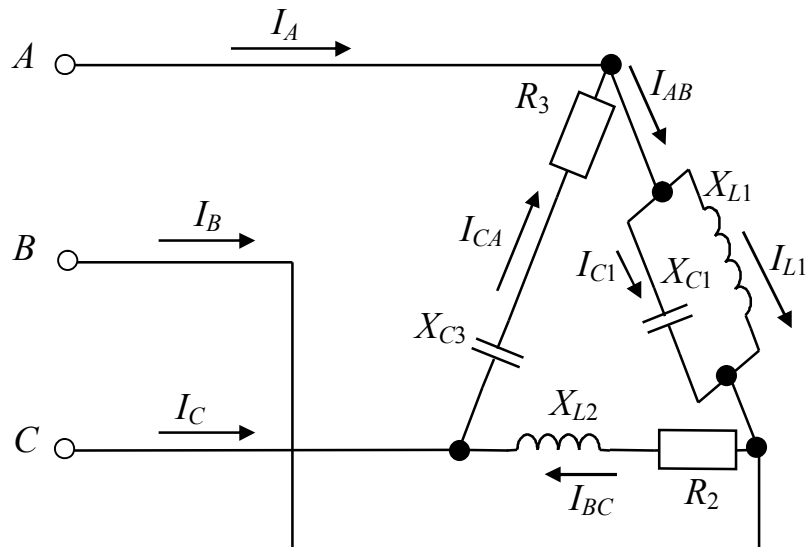
Вариант 2



Дано: $R_1=R_2=R_3$; $X_{L1}=X_{L2}=X_{L3}$; $X_{C1}=X_{C2}=X_{C3}=10$ Ом; показания вольтметров $V1$, $V2$ и $V3$ одинаковы и составляют 100 В.

Определить R_1 , X_{L1} , все токи, линейные и фазные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

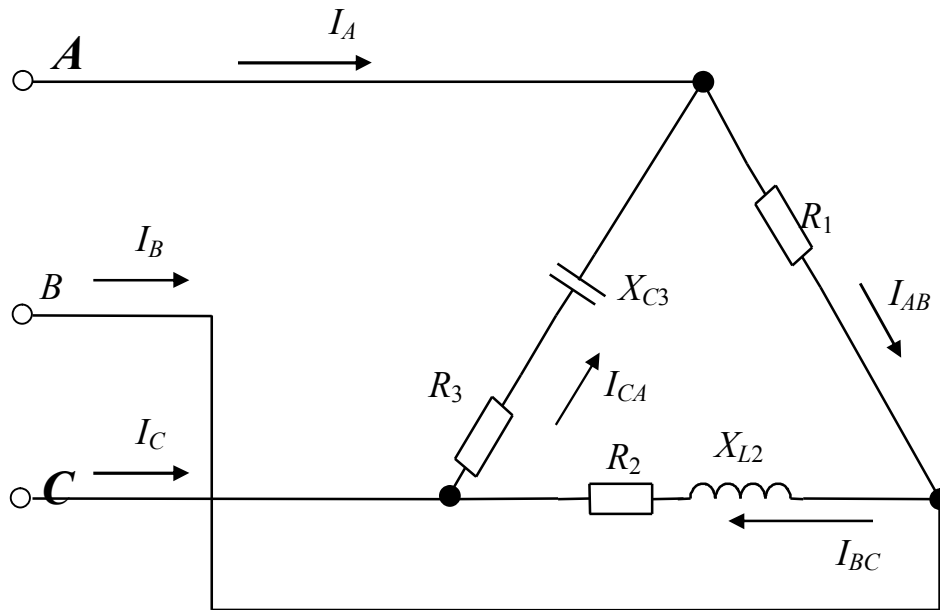
Вариант 3



Дано: $R_2=R_3=X_{L1}=X_{C1}=100$ Ом; $X_{L2}=X_{C3}=100\sqrt{3}$ Ом; $U_{\text{л}}=400$ В.

Определить все токи, фазные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

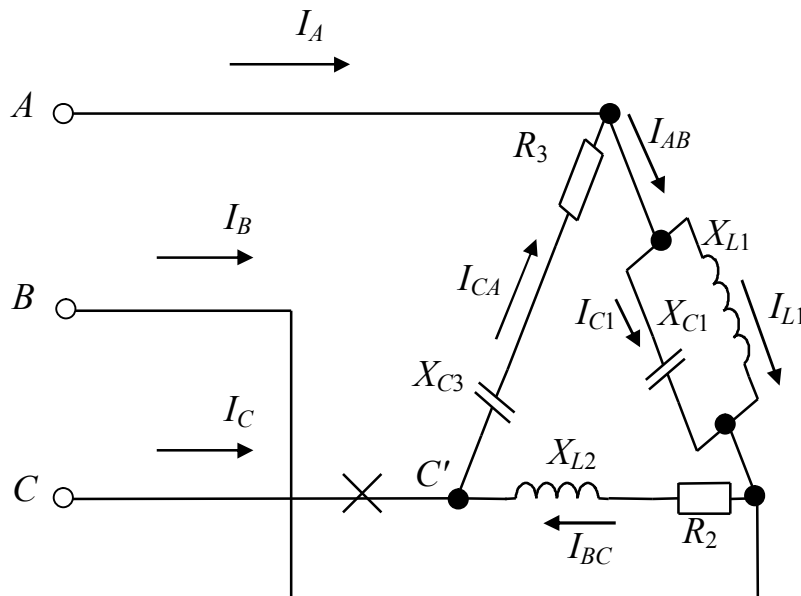
Вариант 4



Дано: $R_1=20 \text{ Ом}$; $R_2=R_3=10 \text{ Ом}$; $X_{L2}=X_{C3}=10\sqrt{3} \text{ Ом}$; $U_{\text{Л}}=100 \text{ В}$.

Определить все токи, фазные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

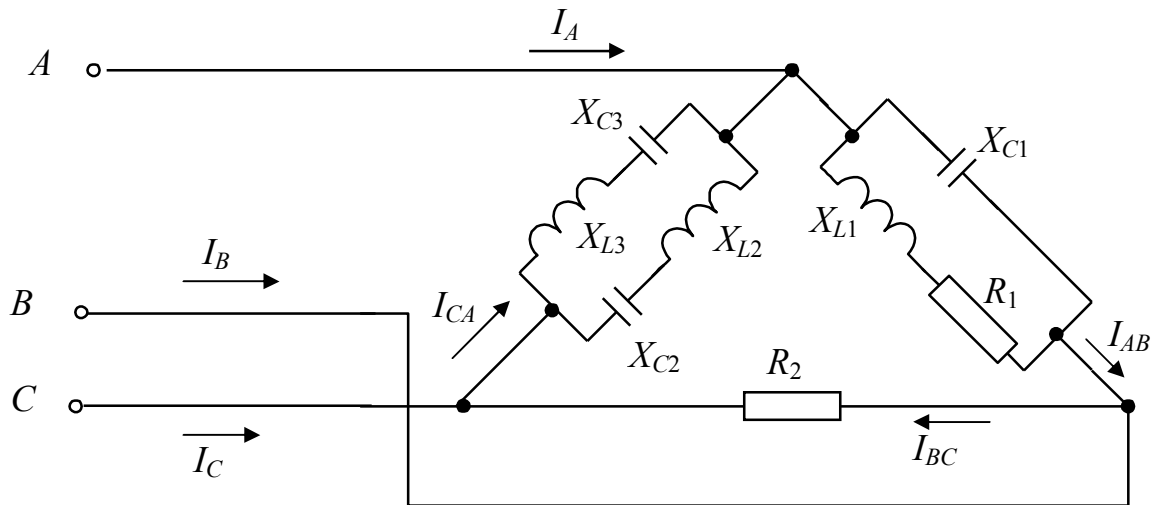
Вариант 5



Дано: $R_2=R_3=X_{L1}=X_{L2}=X_{C1}=X_{C3}=100 \text{ Ом}$; $U_{\text{Л}}=400 \text{ В}$; линейный провод C находится в обрыве.

Определить все токи, фазные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

Вариант 6

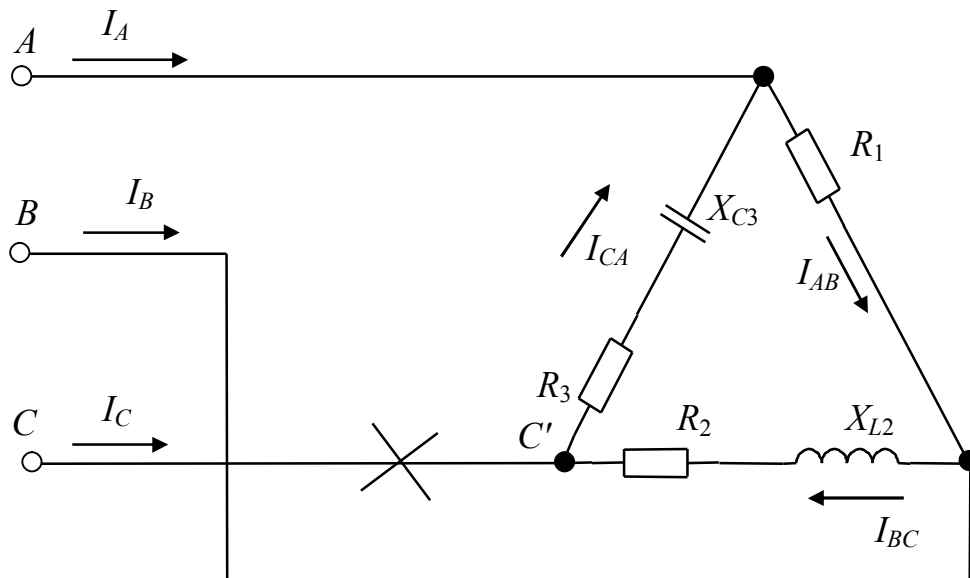


Дано: $R_1 = 30\sqrt{3} \text{ Ом}$; $R_2 = \frac{120}{\sqrt{3}} \text{ Ом}$; $X_{L1} = 30 \text{ Ом}$; $X_{L2} = 50 \text{ Ом}$; $X_{L3} = 100 \text{ Ом}$;

$X_{C1} = 120 \text{ Ом}$; $X_{C2} = 100 \text{ Ом}$; $X_{C3} = 50 \text{ Ом}$; $U_{\text{Л}} = 240\sqrt{3} \text{ В}$.

Определить все токи, фазные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

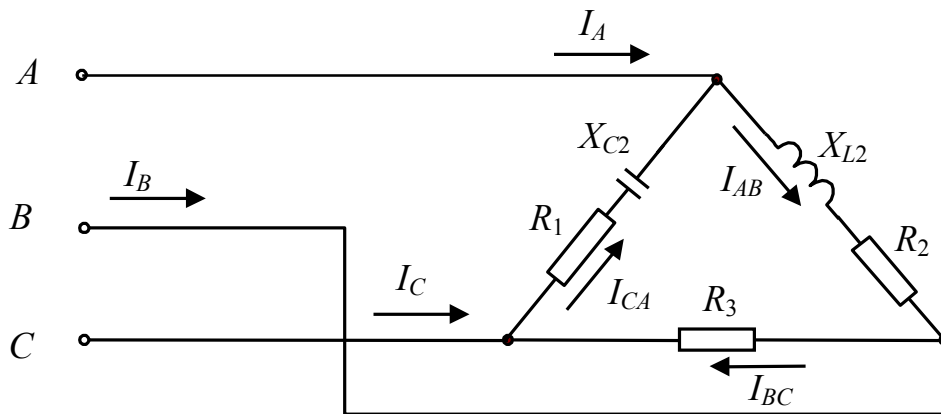
Вариант 7



Дано: $R_1 = 20 \text{ Ом}$; $R_2 = R_3 = 10 \text{ Ом}$; $X_{L2} = X_{C3} = 10\sqrt{3} \text{ Ом}$; $U_{\text{Л}} = 100 \text{ В}$; линейный провод C находится в обрыве.

Определить все токи, фазные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

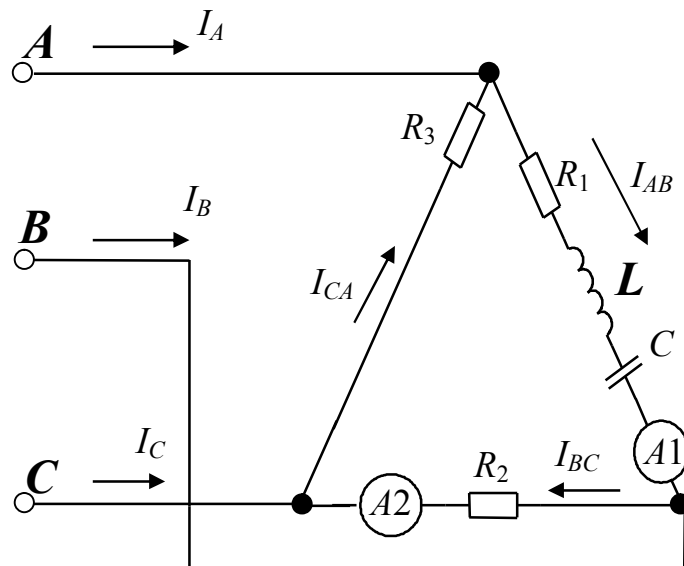
Вариант 8



Дано: $R_1=R_2=100 \text{ Ом}$; $R_3=200 \text{ Ом}$; $X_{L2}=X_{C2}=100\sqrt{3} \text{ Ом}$; $U_{\text{Л}}=200 \text{ В}$.

Определить все токи, фазные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

Вариант 9

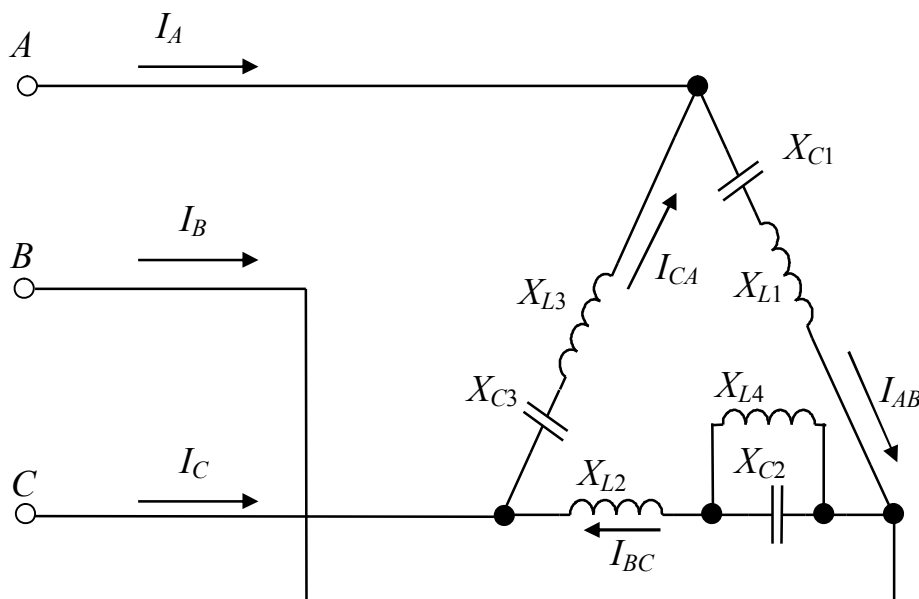


Дано: $R_1=R_2=R_3=100 \text{ Ом}$; $C=\frac{250}{\pi^2} \text{ мкФ}$; $L=100 \text{ мГн}$; $U_{\text{Л}}=300 \text{ В}$;

показания амперметров $A1$ и $A2$ одинаковы.

Определить частоту питающего напряжения f , все токи, фазные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

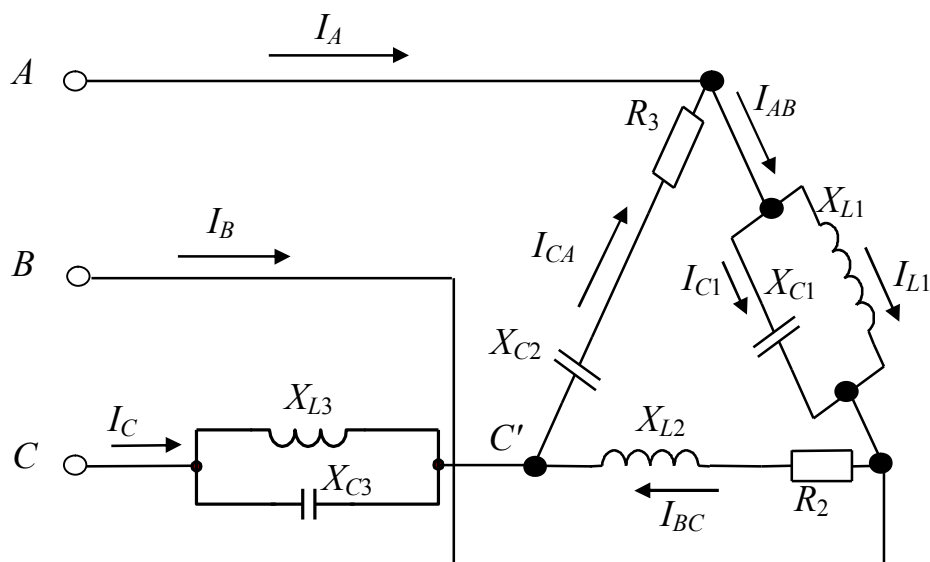
Вариант 10



Дано: $X_{L1}=120\ \Omega$; $X_{L2}=60\ \Omega$; $X_{C1}=80\ \Omega$; $X_{C3}=10\ \Omega$; $X_{L4}=20\ \Omega$; $U_{\text{Л}}=300\ \text{В}$; нагрузка симметрична.

Определить X_{L3} , X_{C2} , все токи, фазные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

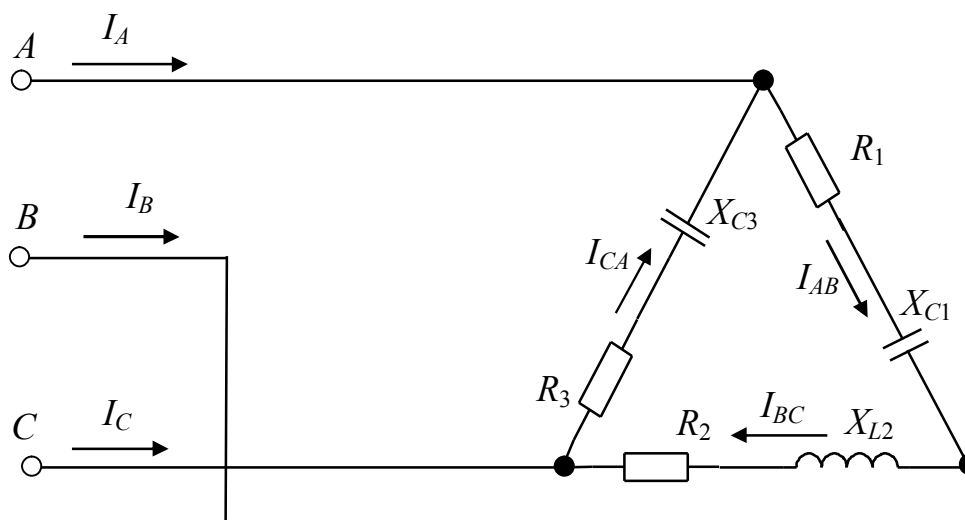
Вариант 11



Дано: $R_2=R_3=X_{L1}=X_{L2}=X_{L3}=X_{C1}=X_{C2}=X_{C3}=100\ \Omega$; $U_{\text{Л}}=300\ \text{В}$.

Определить все токи, фазные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

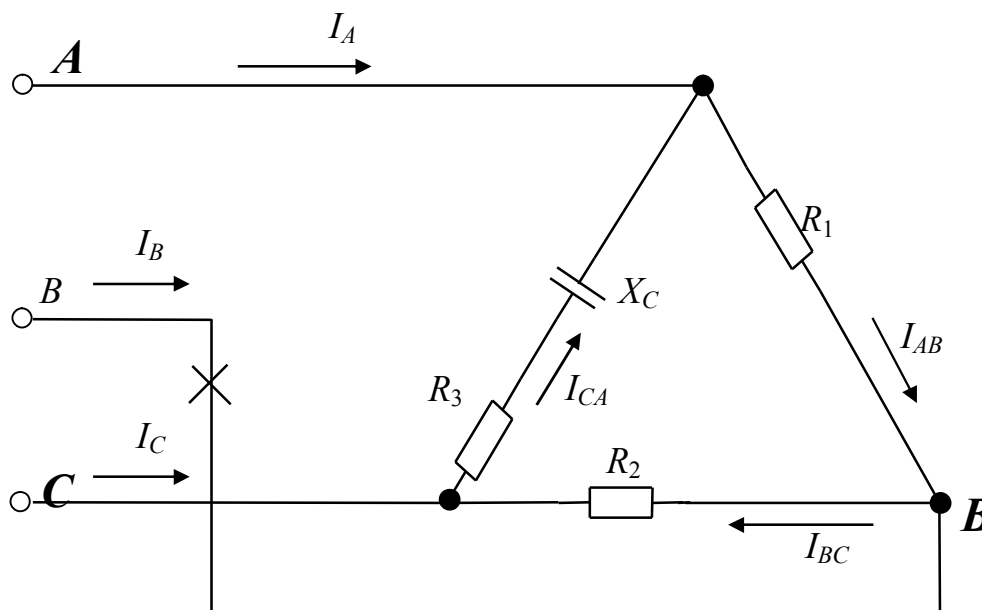
Вариант 12



Дано: $R_1=R_2=R_3=10\sqrt{3}$ Ом; $X_{C1}=X_{L2}=X_{C3}=10$ Ом; $U_{\text{Л}}=100$ В.

Определить все токи, фазные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

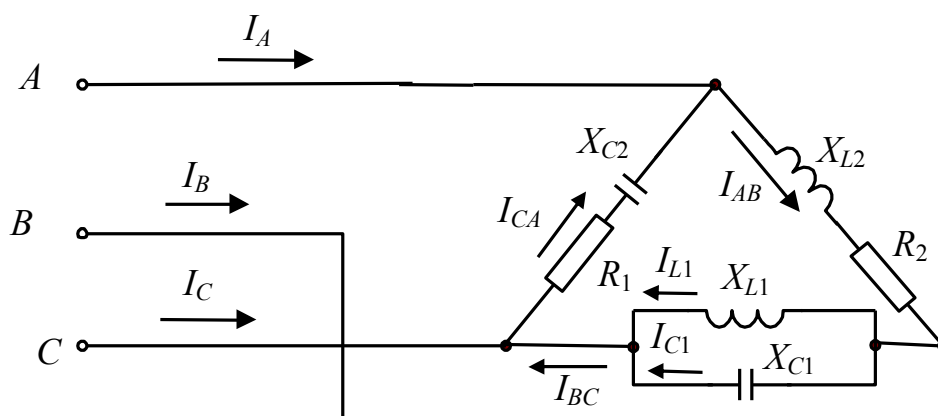
Вариант 13



Дано: $R_1=R_2=20$ Ом; $R_3=10$ Ом; $X_C=10\sqrt{3}$ Ом; линейный провод B находится в обрыве; $U_{\text{Л}}=100$ В.

Определить все токи, фазные и линейные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

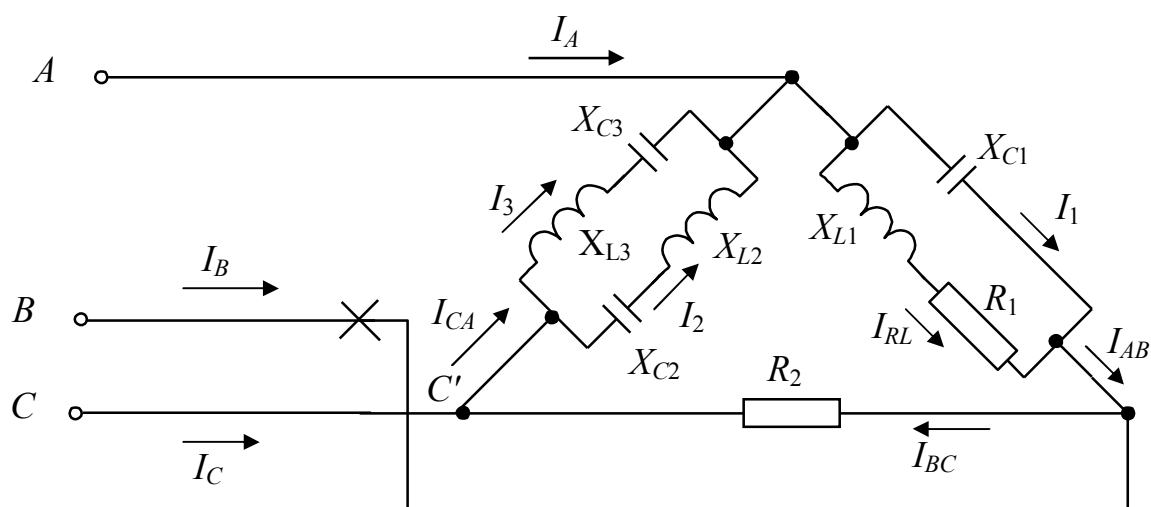
Вариант 14



Дано: $R_1=R_2=75 \text{ Ом}$; $X_{L1}=X_{L2}=X_{C1}=X_{C2}=75\sqrt{3} \text{ Ом}$; $U_{\text{л}}=150 \text{ В}$.

Определить все токи, фазные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

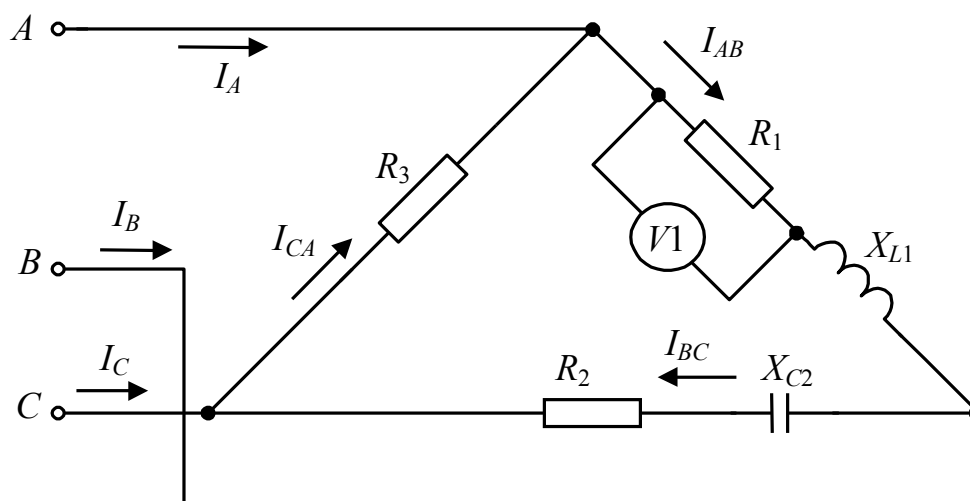
Вариант 15



Дано: $R_1=30\sqrt{3} \text{ Ом}$; $R_2=\frac{120}{\sqrt{3}} \text{ Ом}$; $X_{L1}=30 \text{ Ом}$; $X_{L2}=50 \text{ Ом}$; $X_{L3}=100 \text{ Ом}$; $X_{C1}=120 \text{ Ом}$; $X_{C2}=100 \text{ Ом}$; $X_{C3}=50 \text{ Ом}$; линейный провод B находится в обрыве; $U_{AB}=240\sqrt{3} \text{ В}$.

Определить все токи, фазные и линейные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

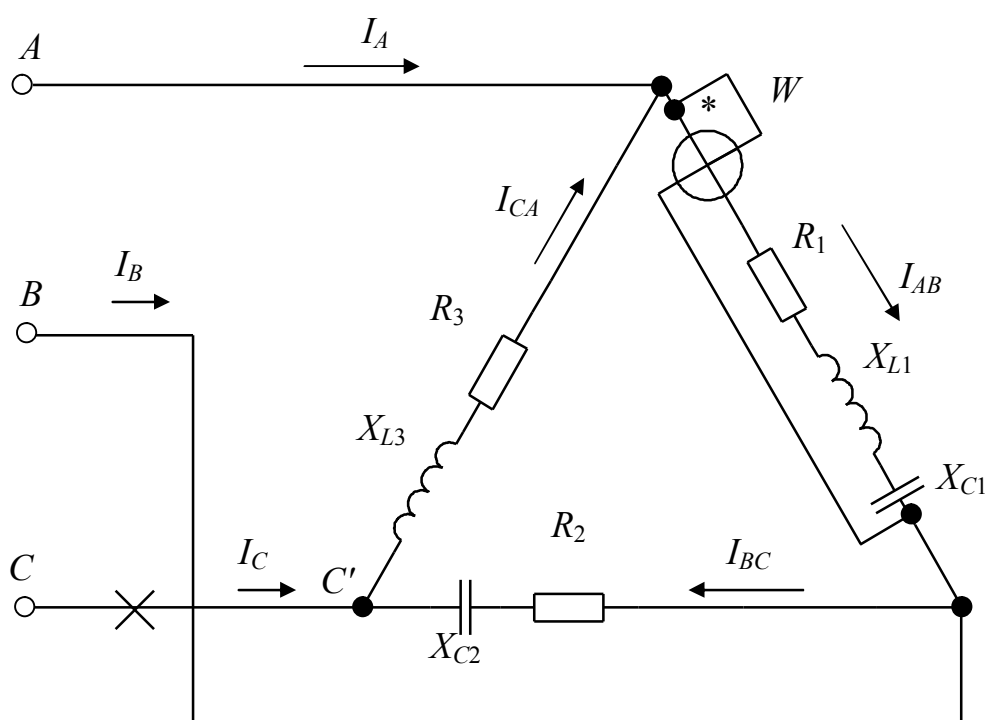
Вариант 16



Дано: $R_1=R_2=50 \text{ Ом}$; $R_3=100 \text{ Ом}$; $X_{L1}=X_{C2}=50\sqrt{3} \text{ Ом}$; показания вольтметра $V1$ составляют 200 В .

Определить все токи, фазные и линейные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

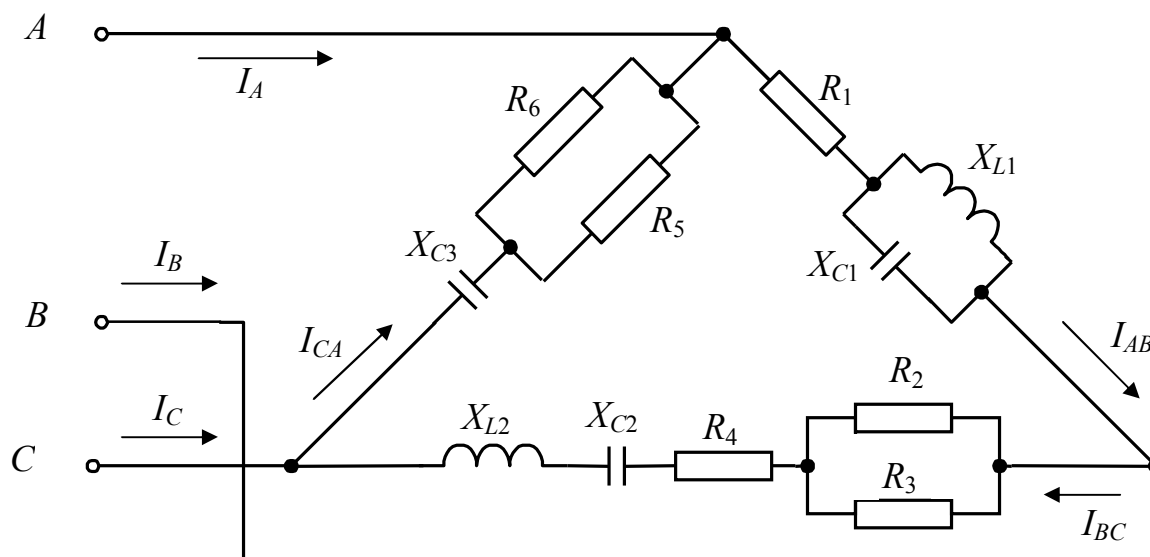
Вариант 17



Дано: $R_1=R_2=R_3$; $X_{L1}=X_{L3}=X_{C1}=X_{C2}=300 \text{ Ом}$; линейный провод C находится в обрыве; $U_{AB}=300 \text{ В}$; показания ваттметра W составляют 150 Вт .

Определить R_1 , все токи, фазные и линейные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

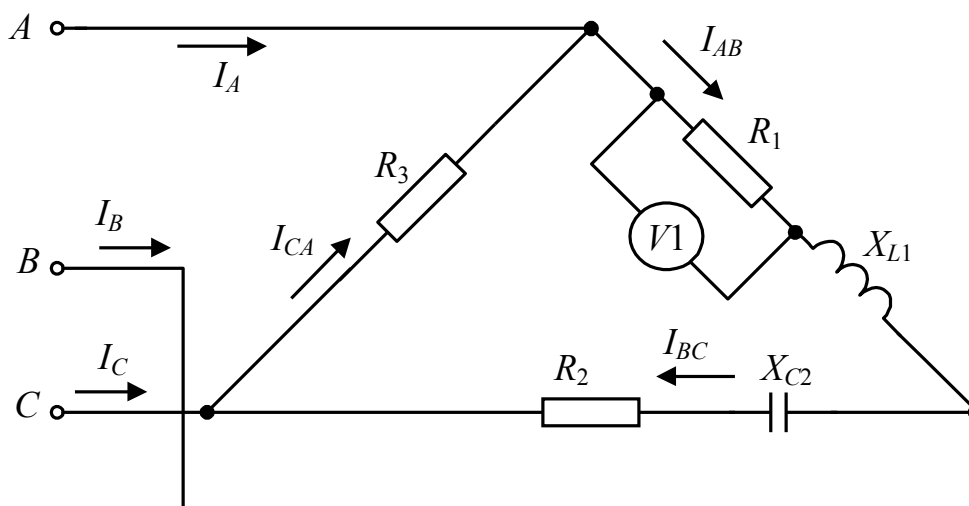
Вариант 18



Дано: $R_1=R_2=40 \text{ Ом}$; $R_4=20 \text{ Ом}$; $R_5=80 \text{ Ом}$; $X_{L2}=100 \text{ Ом}$; $X_{C1}=15 \text{ Ом}$; $X_{C3}=30 \text{ Ом}$; $U_{\text{Л}}=200 \text{ В}$; нагрузка симметрична.

Определить R_3 , R_6 , X_{L1} , X_{C2} , все токи, фазные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

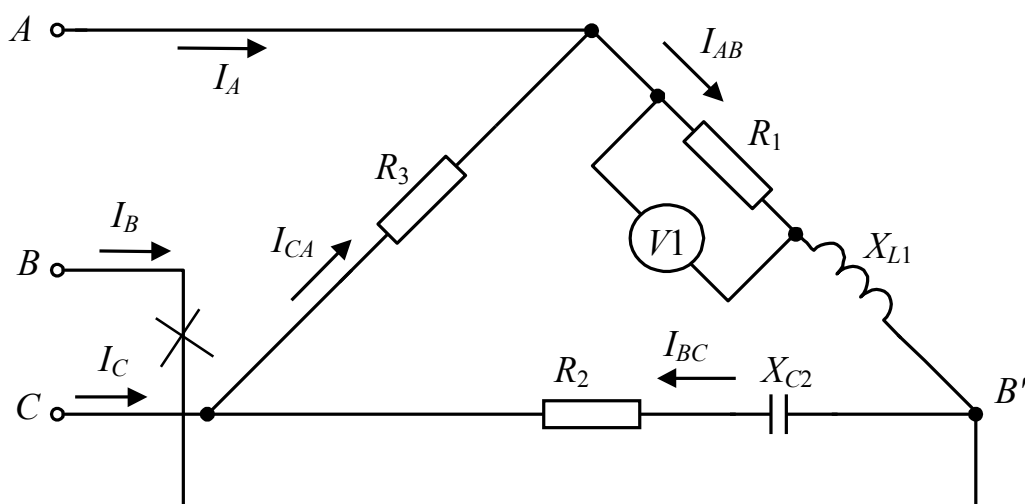
Вариант 19



Дано: $R_1=R_2=50 \text{ Ом}$; $R_3=100 \text{ Ом}$; $X_{L1}=X_{C2}=50\sqrt{3} \text{ Ом}$; показания вольтметра $V1$ составляют 200 В .

Определить все токи, фазные и линейные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

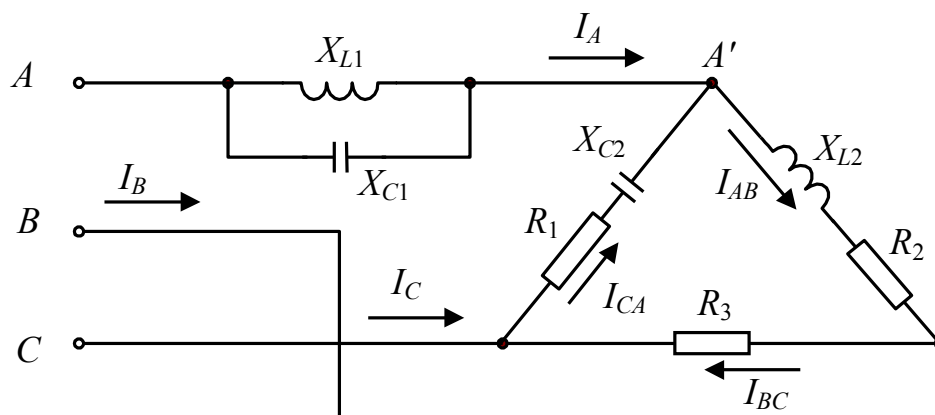
Вариант 20



Дано: $R_1=R_2=50\ \Omega$; $R_3=100\ \Omega$; $X_{L1}=X_{C2}=50\sqrt{3}\ \Omega$; линейный провод B находится в обрыве; показания вольтметра $V1$ составляют $200\ \text{В}$.

Определить все токи, фазные и линейные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

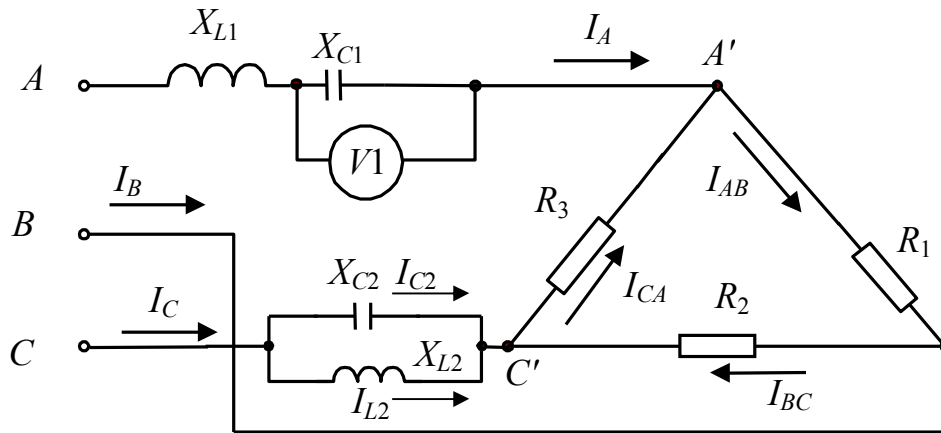
Вариант 21



Дано: $R_1=R_2=R_3=100\ \Omega$; $X_{L1}=X_{L2}=X_{C1}=X_{C2}=75\ \Omega$; $U_{\text{Л}}=200\ \text{В}$.

Определить все токи, фазные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

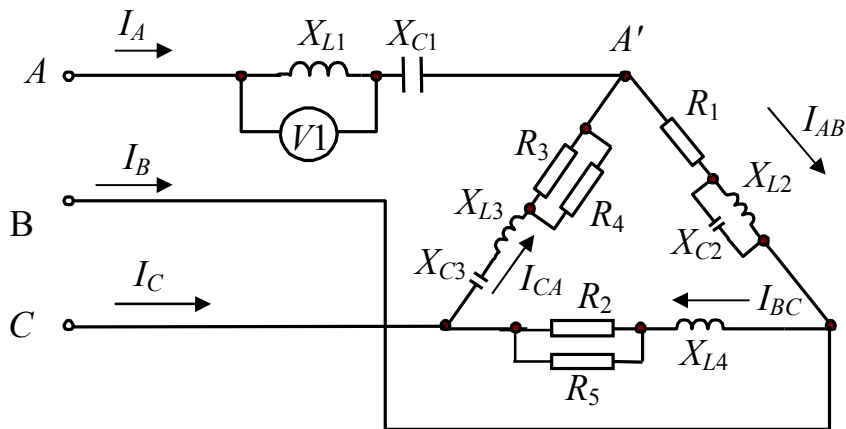
Вариант 22



Дано: $R_1=30 \text{ Ом}$; $R_2=20 \text{ Ом}$; $R_3=10 \text{ Ом}$; $X_{L1}=X_{L2}=X_{C1}=X_{C2}=100 \text{ Ом}$; показания вольтметра $V1$ составляют 200 В .

Определить все токи, фазные и линейные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

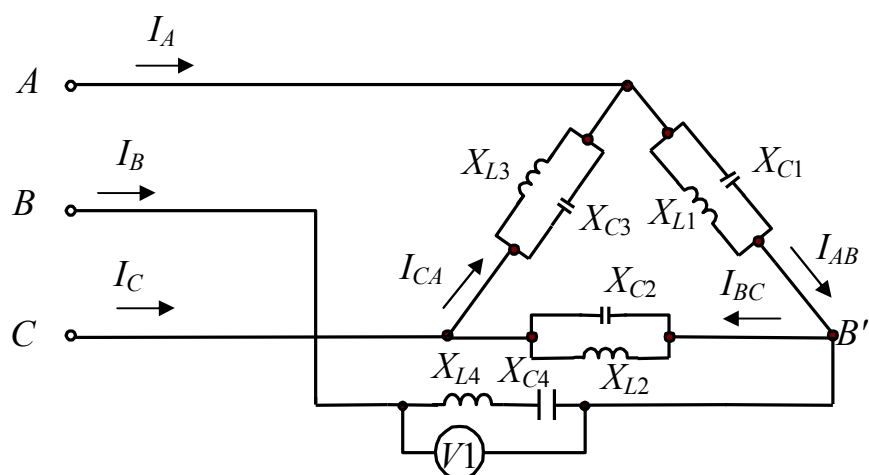
Вариант 23



Дано: $R_1=40 \text{ Ом}$; $R_2=120 \text{ Ом}$; $R_3=R_4=80 \text{ Ом}$; $R_5=60 \text{ Ом}$; $X_{L2}=25 \text{ Ом}$; $X_{L1}=X_{C1}=X_{C2}=X_{C3}=X_{L4}=50 \text{ Ом}$; $X_{L3}=100 \text{ Ом}$; показания вольтметра $V1$ составляют $100\sqrt{3} \text{ В}$.

Определить все токи, фазные и линейные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

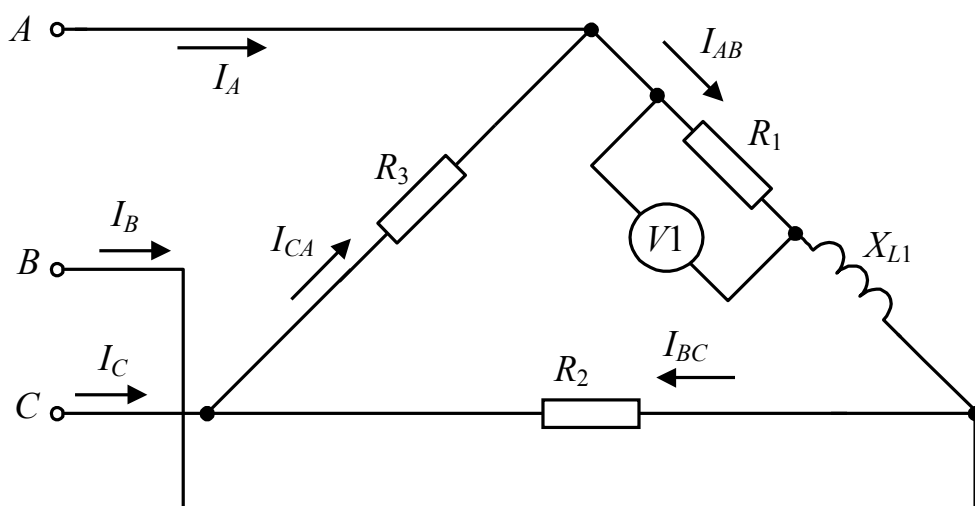
Вариант 24



Дано: $X_{L1}=X_{L3}=X_{C1}=X_{C2}=80 \text{ Ом}$; $X_{L2}=X_{L4}=X_{C3}=X_{C4}=40 \text{ Ом}$; $U_L=400 \text{ В}$.

Определить все токи, показания вольтметра $V1$, фазные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

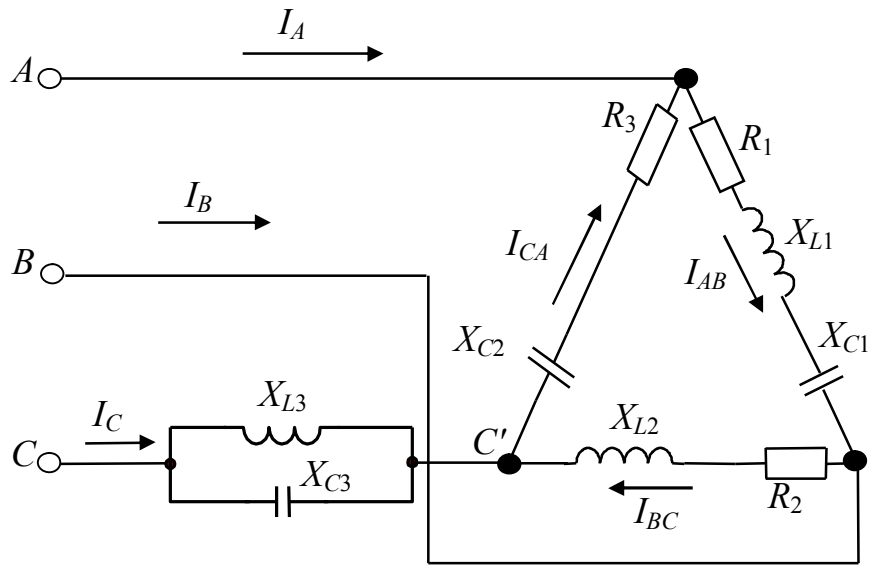
Вариант 25



Дано: $R_1=50 \text{ Ом}$; $R_2=R_3=100 \text{ Ом}$; $X_{L1}=50\sqrt{3} \text{ Ом}$; показания вольтметра $V1$ составляют 200 В .

Определить все токи, фазные и линейные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

Вариант 26



Дано: $R_1=R_2=R_3=X_{L1}=X_{L2}=X_{L3}=X_{C1}=X_{C2}=X_{C3}=100 \text{ Ом}$; $U_{\text{Л}}=200 \text{ В}$.

Определить все токи, фазные напряжения, активную, реактивную, полную мощности. Построить векторную диаграмму.

4. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

4.1. Основные понятия

Асинхронные машины относятся к классу электрических машин переменного тока. Мощность асинхронных машин может быть от долей ватта до нескольких тысяч киловатт.

Асинхронные машины обратимы, то есть они могут работать в режиме двигателя и в режиме генератора. В режиме двигателя рабочие характеристики и эксплуатационные свойства асинхронной машины лучше, чем в режиме генератора. Поэтому асинхронные машины практически всегда используются в качестве двигателей. Асинхронные двигатели отличаются высокой надежностью в работе, простотой конструкции и простотой в эксплуатации.

4.2. Устройство трехфазного асинхронного двигателя

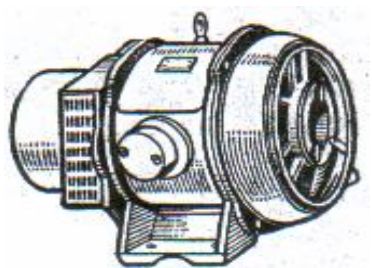


Рис. 56. Общий вид асинхронного двигателя

Асинхронный двигатель (рис. 56) состоит из двух основных частей: статора и ротора.

Статор – это неподвижная часть машины, которая состоит из станины с сердечником и трехфазной обмотки. Сердечник выполнен из листов электротехнической стали. Фазы трехфазной обмотки уложены в пазах сердечника, расположенных в пространстве относительно друг друга под углом 120° . Начала и концы фаз обмоток выведены на клеммы клеммной

на корпусе машины. В зависимости от того, на какое напряжение рассчитана статорная обмотка, она соединяется по схеме «звезда» или по схеме «треугольник» (см. рис. 57).

Ротор – это вращающаяся часть машины. Ротор состоит из вала с сердечником и обмотки. Сердечник выполнен из листов электротехнической стали и имеет цилиндрическую форму.

Ротор асинхронного двигателя может быть короткозамкнутым или фазным.

Большинство применяемых двигателей имеют короткозамкнутый ротор (рис. 58). Такие двигатели значительно дешевле, а их обслуживание значительно проще. Обмотка короткозамкнутого ротора выполняется в виде медных или алюминиевых стержней, уложенных в пазы сердечника. По торцам стержни замкнуты между собой накоротко (рис. 59). За свой

внешний вид короткозамкнутую обмотку называют «беличьим колесом» или «беличьей клеткой».

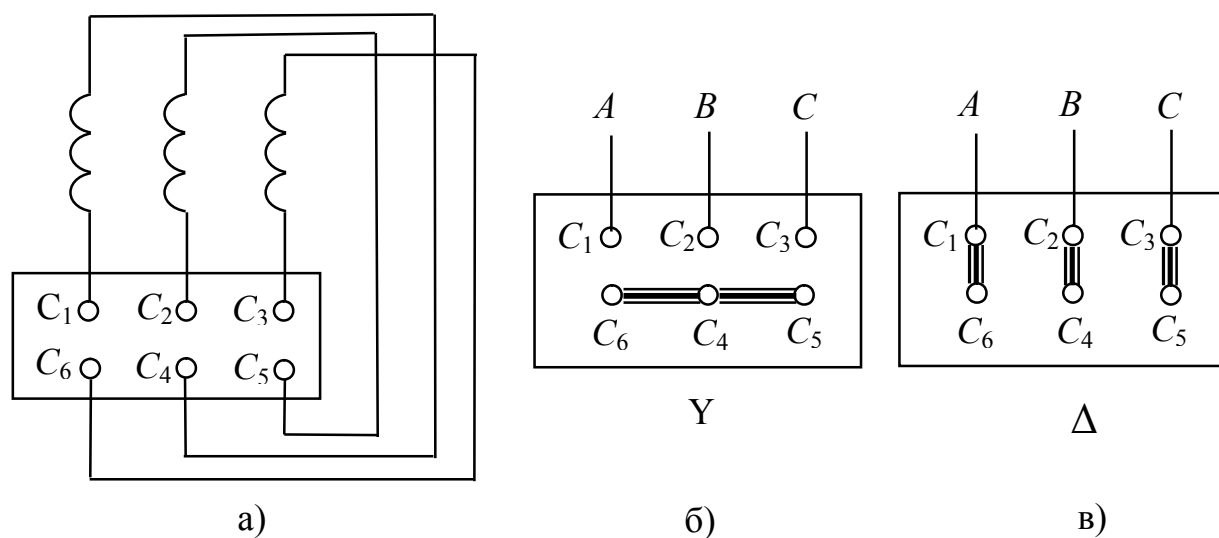


Рис. 57. Схема подключения фаз обмоток статора к клеммной коробке (а); соединение выводов фаз обмоток по схеме «звезда» (б) и по схеме «треугольник» (в).

C₁, C₂, C₃ – начала фаз обмоток; C₄, C₅, C₆ – концы фаз обмоток

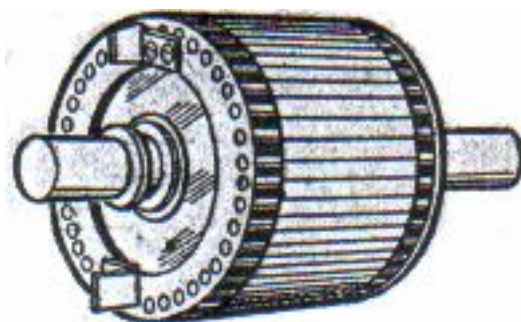


Рис. 58. Общий вид короткозамкнутого ротора

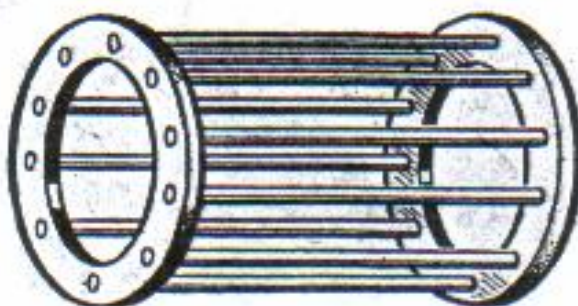


Рис. 59. Общий вид короткозамкнутой обмотки типа «беличье колесо»

Фазный ротор (рис. 60), называемый также ротором с контактными кольцами, имеет трехфазную обмотку, которая выполняется изолированным проводом. Три фазы обмотки ротора соединяются по схеме «звезда».

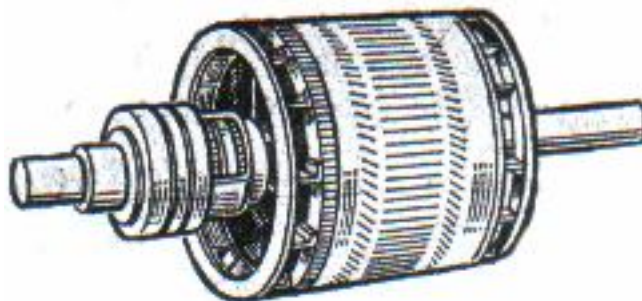
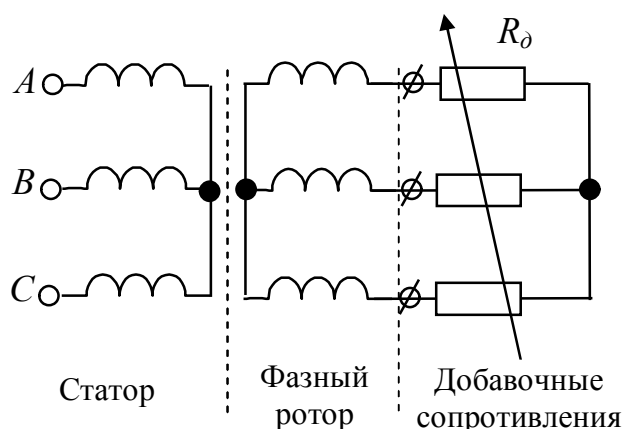
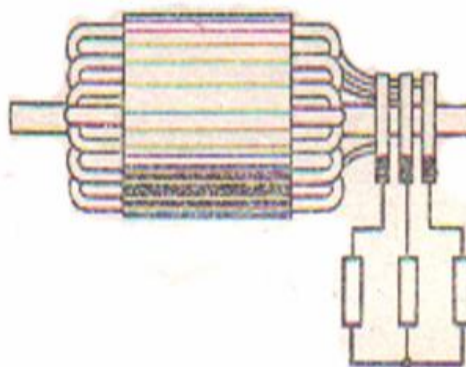


Рис. 60. Общий вид фазного ротора

Свободные концы фаз обмотки соединяются с тремя контактными кольцами, закрепленными на валу ротора. На кольца наложены графитовые щетки, установленные в щеткодержателях. Через щетки и кольца обмотка ротора подключена к клеммной коробке. К выводам такой обмотки обычно подключаются добавочные сопротивления R_d в виде трехфазного реостата (рис. 61).



а)



б)

Рис. 61. Электрическая схема трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором (а) и общий вид фазного ротора с подключенными к его обмоткам добавочными сопротивлениями через щеточный контакт с контактными кольцами (б)

Включение реостата в цепь ротора дает возможность существенно улучшить условия пуска двигателя: уменьшить пусковой ток и увеличить пусковой момент. Кроме этого, реостатом, включенным в цепь ротора, можно плавно регулировать частоту вращения двигателя.

4.3. Вращающееся магнитное поле статора асинхронного двигателя

Принцип работы асинхронного двигателя основан на получении вращающегося магнитного поля. При поданном на обмотку статора трехфазном напряжении в фазах обмотки протекают токи:

$$\left. \begin{aligned} i_A &= I_m \sin \omega t; \\ i_B &= I_m \sin(\omega t - 120^\circ); \\ i_C &= I_m \sin(\omega t - 240^\circ). \end{aligned} \right\} \quad (160)$$

Ток в каждой фазе создает свое переменное магнитное поле. Эти поля складываются и образуют результирующее магнитное поле. Картина результирующего магнитного поля непрерывно изменяется, но ее можно изобразить для любого момента времени (рис. 62). За положительное направление токов принимается направление от начала к концу фазы обмотки статора.

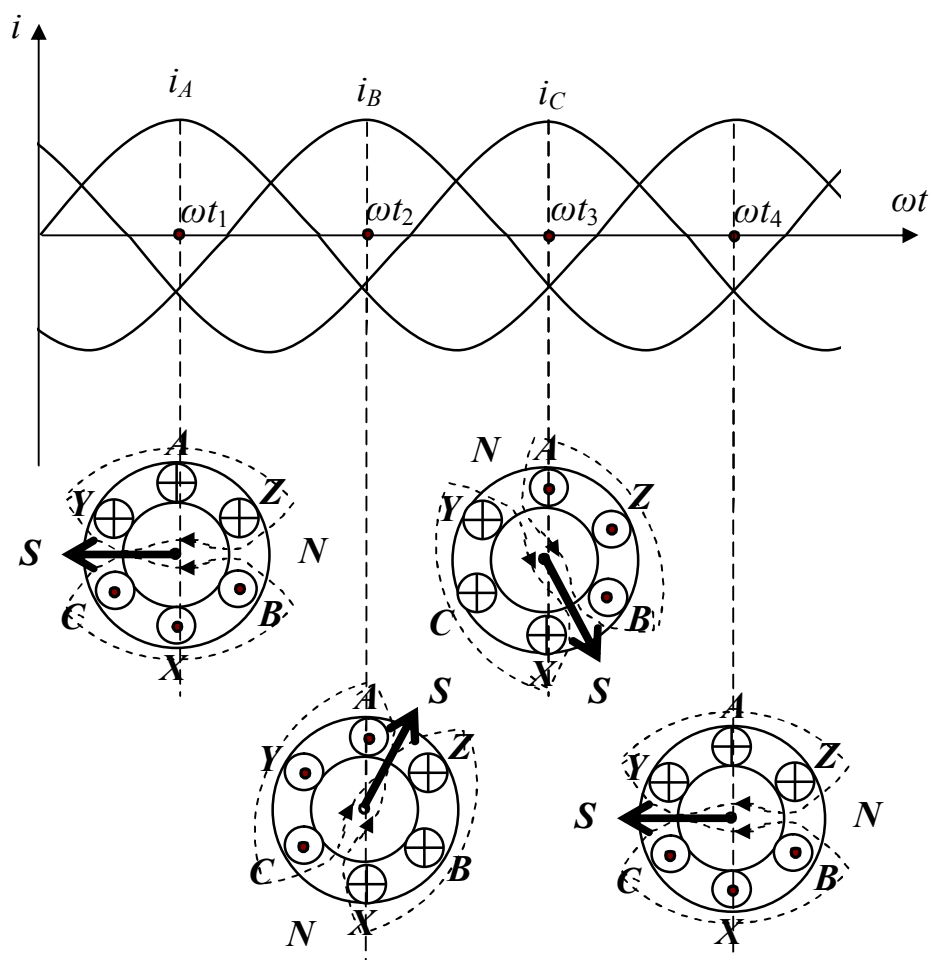


Рис. 62. График трехфазной системы токов и упрощенные картины результирующего магнитного поля для четырех моментов времени.
A, B, C – начала фаз обмотки статора; X, Y, Z – концы фаз обмотки статора

На рис. 62 стрелка указывает направление оси полюсов магнитного поля. Из рисунка видно, что при изменении токов происходит равномерное вращение всего спектра силовых линий магнитного поля, а конфигурация силовых линий при этом не изменяется. Такое поле принято называть вращающимся. Частота вращения магнитного поля

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}, \quad (161)$$

где f_1 – частота тока в обмотке статора (частота питающего напряжения); p – число пар полюсов.

Число пар полюсов основного магнитного поля асинхронного двигателя определяется количеством катушек в каждой фазе и способом соединения этих катушек между собой (рис. 63).

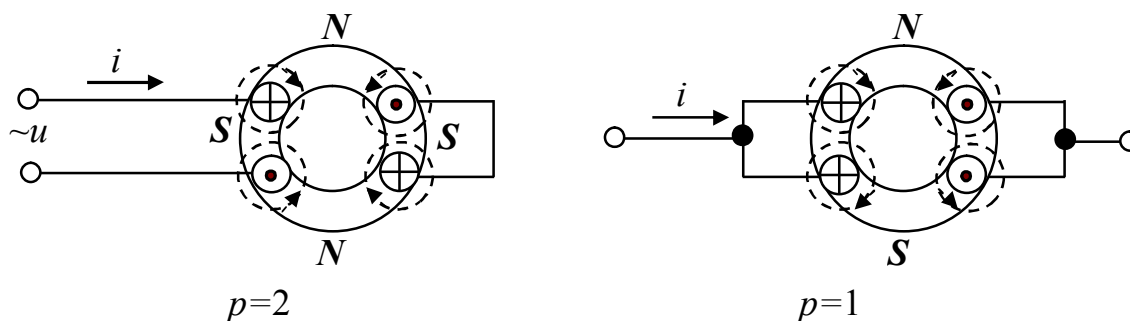


Рис. 63. Зависимость числа пар полюсов от схемы соединения катушек в каждой фазе обмотки статора

При последовательном соединении двух катушек каждой обмотки статора число пар полюсов $p=2$; частота вращения магнитного поля при частоте питающего напряжения $f_1=50$ Гц в соответствии с формулой

$$(161) \quad n_1 = \frac{60 f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \frac{\text{об}}{\text{мин}}.$$

При параллельном соединении двух катушек каждой фазы обмотки статора число пар полюсов $p=1$; $n_1=3000 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$.

Если две фазы подводимого к статору напряжения поменять местами, т.е. изменить порядок чередования токов в обмотках статора на обратный, результирующее магнитное поле будет вращаться в обратном направлении.

4.4. Принцип действия асинхронного двигателя

При включении двигателя в трехфазную сеть в статоре образуется вращающееся магнитное поле, силовые линии которого пересекают обмотки статора и ротора. При этом согласно закону электромагнитной индукции в каждой фазе обмоток статора и ротора наводятся ЭДС:

$$E_1 = 4,44 \cdot w_1 \cdot k_1 \cdot f_1 \cdot \Phi; \quad (162)$$

$$E_2 = 4,44 \cdot w_2 \cdot k_2 \cdot f_2 \cdot \Phi, \quad (163)$$

где w_1 и w_2 – число витков в фазах обмоток статора и ротора; k_1 и k_2 – обмоточные коэффициенты статора и ротора, указывающие степень использования магнитного потока Φ в обмотках статора и ротора.

Так как цепь ротора замкнута, то в обмотке ротора под действием ЭДС E_2 протекает ток I_2 . Взаимодействие тока ротора с магнитным полем машины приводит к возникновению вращающего электромагнитного момента

$$M = C \cdot \Phi \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2, \quad (164)$$

где C – постоянный коэффициент, зависящий от конструкции двигателя; $\cos \varphi_2$ – коэффициент мощности цепи ротора; $I_2 \cdot \cos \varphi_2$ – активная составляющая тока ротора.

Ротор вращается в том же направлении, что и магнитное поле статора. Частота вращения ротора асинхронной машины, работающей в режиме двигателя, всегда меньше частоты вращения магнитного поля статора, так как только в этом случае будет иметь место изменение магнитного потока, пересекающего обмотку ротора.

Мерой отставания частоты вращения ротора n_2 от частоты вращения магнитного поля n_1 является скольжение

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}. \quad (165)$$

При неподвижном роторе ($n_2=0$) $S=1$.

Таким образом, в момент пуска двигателя $S=1$.

Если ротор двигателя вращается с такой же частотой, что и магнитное поле статора ($n_2 = n_1$), то $S=0$. Такой режим называется режимом идеального холостого хода.

Номинальное значение частоты вращения ротора $n_{2н}$, соответствующее расчетным значениям нагрузки, частоты и напряжения сети, указывается заводом-изготовителем на корпусе двигателя.

Для различных двигателей в номинальном режиме $S_n=0,02-0,08$.

От величины скольжения зависит частота тока в обмотке ротора

$$f_2 = S \cdot f_1, \quad (166)$$

а также ЭДС E_2 , наводимая в каждой фазе обмотки ротора,

$$E_2 = E_{2к} \cdot S, \quad (167)$$

где $E_{2к}$ – ЭДС при неподвижном роторе (является параметром двигателя).

Таким образом, ЭДС, наводимая в обмотке ротора вращающимся магнитным полем, прямо пропорциональна величине скольжения.

4.5. Механические характеристики асинхронного двигателя

Эксплуатационные параметры асинхронного двигателя наглядно иллюстрируются механическими характеристиками.

Механические характеристики $M=f(S)$ и $n_2=f(M)$ могут быть рассчитаны и построены в соответствии с уравнением

$$M = \frac{3U_{1\phi}^2 \frac{R'_2}{S}}{\Omega_0[(R_1 + \frac{R'_2}{S})^2 + (X_1 + X'_2)^2]}, \quad (168)$$

где M – вращающий момент; $U_{1\phi}$ – фазное напряжение статорной обмотки; S – скольжение; R_1 , X_1 – значения активного и индуктивного сопротивлений статорной обмотки; R'_2 , X'_2 – приведенные значения активного и индуктивного сопротивлений роторной обмотки; f_1 – частота напряжения питания статорной обмотки; p – число пар полюсов; $\Omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}$

– угловая скорость вращения магнитного поля.

По зависимости $M=f(S)$ легко построить характеристику $n_2=f(M)$.

Для построения механической характеристики по уравнению (168) необходимо произвести расчет параметров электрической цепи обмоток статора и ротора. Для расчета эти данные можно найти лишь в полных каталогах асинхронных машин.

В эксплуатационных условиях для расчета и построения механических характеристик по паспортным данным пользуются упрощенной формулой

$$M = \frac{2M_{кр}}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S}}, \quad (169)$$

где $M_{кр}$ – критический (максимальный) вращающий момент, который может развивать двигатель; $S_{кр}$ – скольжение, соответствующее критическому моменту.

$$M_{кр} = \lambda \cdot M_n, \quad (170)$$

где λ – коэффициент перегрузки по моменту; M_n – номинальный момент двигателя.

$$M_n = \frac{9550 P_{2н}}{n_{2н}} [H \cdot м], \quad (171)$$

где $P_{2н}$ – номинальная мощность двигателя на валу в кВт; $n_{2н}$ – номинальная частота вращения ротора в $\frac{\text{об}}{\text{мин}}$.

Скольжение, соответствующее критическому моменту,

$$S_{кр} = S_n (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}). \quad (172)$$

Зная $M_{кр}$ и $S_{кр}$ и задаваясь значениями скольжения S в пределах от 0 до 1, по уравнению (169) рассчитывают и строят механическую характеристику двигателя $M=f(S)$.

Механическую характеристику $n_2=f(M)$ (рис. 64) можно получить из характеристики $M=f(S)$, учитывая, что

$$n_2 = n_1(1-S), \quad (173)$$

где n_1 – частота вращения магнитного поля.

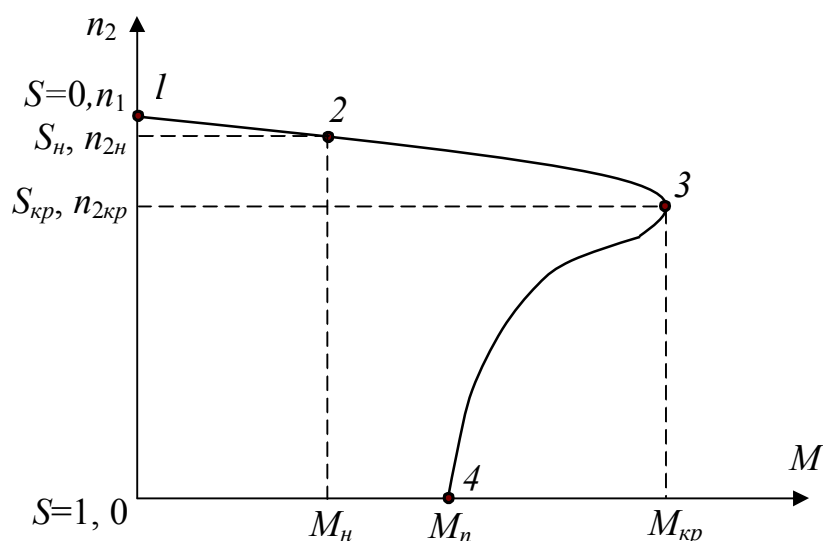


Рис. 64. Механическая характеристика асинхронного двигателя

На графике механической характеристики (см. рис. 64) можно выделить четыре основные точки: 1) $S=0$, $n_2=n_1$, $M=0$; 2) $S=S_n$, $n_2=n_{2n}$, $M=M_n$; 3) $S=S_{кр}$, $n_2=n_{2кр}$, $M=M_{кр}$; 4) $S=1$, $n_2=0$, $M=M_n$ (M_n – пусковой момент).

Точка 1 соответствует режиму *идеального холостого хода*, когда отсутствует момент сопротивления на валу двигателя, возникающий за счет полезной нагрузки, трения в подшипниках, сопротивления воздуха.

Точка 2 соответствует *номинальному* режиму работы двигателя.

Точка 3 соответствует *критическому* режиму, когда двигатель развивает максимально возможный момент. При увеличении момента нагрузки двигатель выходит из рабочего режима и останавливается.

Точка 4 соответствует *пусковому* режиму двигателя.

Ток ротора по закону Ома определяется выражением

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}, \quad (174)$$

где E_2 – ЭДС ротора; R_2 и X_2 – соответственно активное и индуктивное сопротивление обмотки ротора.

X_2 , как и E_2 , достигает наибольшего значения $X_{2к}$ в момент пуска при $S=1$, т.е.

$$X_2 = S \cdot X_{2к}. \quad (175)$$

С учетом уравнений (167) и (175) выражение (174) примет вид

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{S \cdot E_{2к}}{\sqrt{R_2^2 + S^2 \cdot X_{2к}^2}} = \frac{E_{2к}}{\sqrt{\frac{R_2^2}{S^2} + X_{2к}^2}}, \quad (176)$$

где $X_{2к}$ – приведенное индуктивное сопротивление ротора.

Из уравнения (176) видно, что ток I_2 достигает наибольшего значения при $S=1$, т.е. в момент пуска двигателя.

Линейный участок механической характеристики, на котором $n_{2кр} < n_2 < n_1$, является рабочим (см. рис. 64). Участок механической характеристики, на котором $0 < n_2 < n_{2кр}$, характеризует изменение вращающего момента и частоты вращения ротора при пуске двигателя.

Механическая характеристика асинхронного двигателя при отсутствии добавочных сопротивлений в цепи ротора называется *естественной*. При введении в цепь фазного ротора добавочных сопротивлений механические характеристики будут *искусственными* (рис. 65).

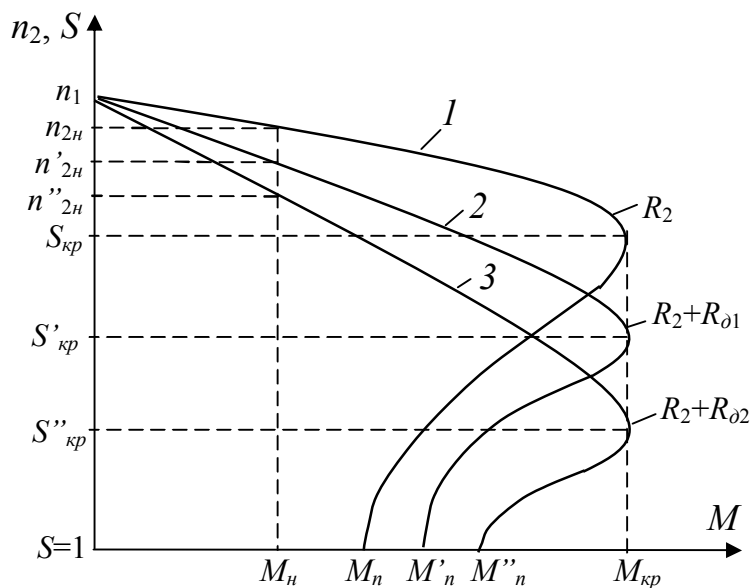


Рис. 65. Естественная (1) и искусственные (2, 3) механические характеристики асинхронного двигателя ($R_{02} > R_{01}$)

Для искусственных механических характеристик уравнение (169) примет вид

$$M = \frac{2M_{кр}}{\frac{S}{S_{кр.и}} + \frac{S_{кр.и}}{S}}, \quad (177)$$

где $S_{кр.и}$ – критическое скольжение на искусственной характеристике.

$$S_{кр.и} = S_{кр} \frac{R_2 + R_\delta}{R_2}, \quad (178)$$

где $S_{кр}$ – критическое скольжение на естественной характеристике; R_2 – активное сопротивление фазы обмотки ротора; R_δ – добавочное сопротивление в цепи фазы обмотки ротора.

Как видно из уравнения (178), с введением добавочного сопротивления возрастает $S_{кр}$.

Добавочное сопротивление в цепи ротора в соответствии с законом Ома уменьшает ток ротора I_2 . Но, так как, согласно уравнению (175), индуктивное сопротивление ротора X_2 в момент пуска ($S=1$) имеет наибольшее значение ($\cos\varphi_2$ очень мал), введение добавочного (активного) сопротивления в цепь ротора приводит к *значительному* увеличению $\cos\varphi_2$ и, следовательно, согласно выражению (164), к увеличению пускового момента.

Таким образом, при введении в цепь ротора добавочных сопротивлений уменьшается частота вращения ротора, увеличиваются скольжение и пусковой момент (см. рис. 65).

Асинхронные двигатели имеют небольшой пусковой момент по сравнению с двигателями постоянного тока. Для увеличения пускового момента асинхронного двигателя в цепь ротора включают добавочные пусковые сопротивления, которые по мере увеличения частоты вращения выводят из цепи ротора.

При пуске ток двигателя составляет $I_n=(5-7)I_n$, по мере увеличения частоты вращения ток уменьшается (рис. 66).

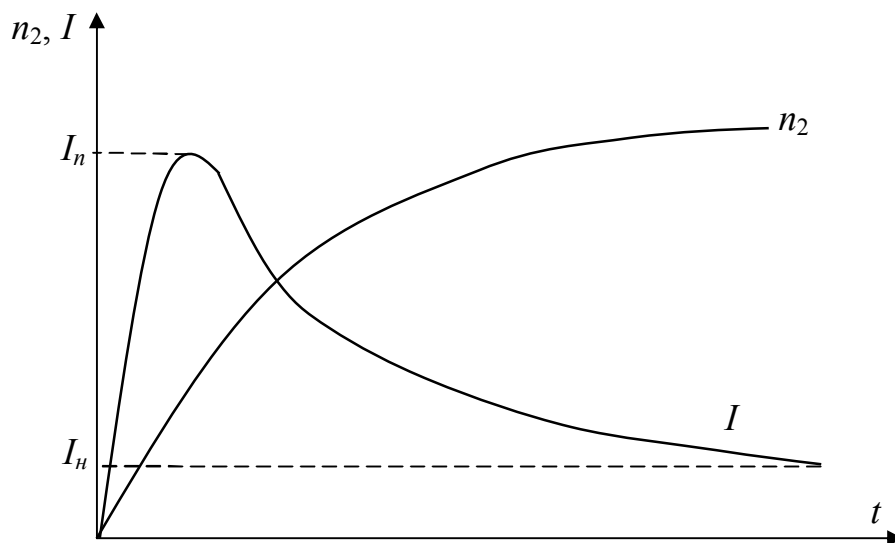


Рис. 66. Графики изменения тока и частоты вращения ротора при пуске асинхронного двигателя

При пуске двигателя за счет введения добавочных (пусковых) сопротивлений в цепь фазного ротора (рис. 67) снижается величина пускового тока до заданной кратности.

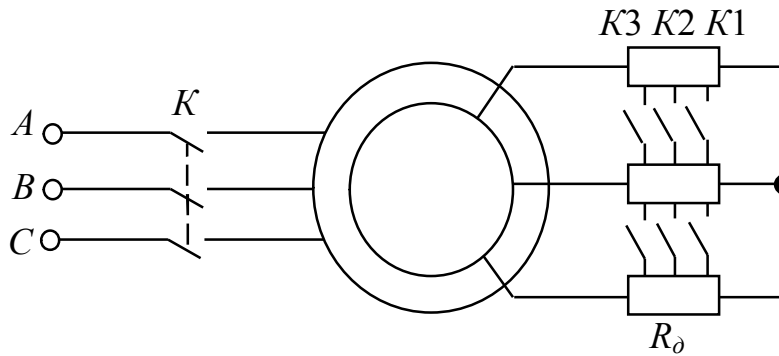


Рис. 67. Схема асинхронного двигателя с фазным ротором при введенных в цепь ротора пусковых сопротивлениях

По мере разбега путем последовательного выведения ступеней пускового сопротивления (замыканием контактов $K1$, $K2$, $K3$) достигается номинальная частота вращения двигателя.

4.6. Свойство саморегулирования вращающего момента асинхронного двигателя

Работе двигателя в номинальном режиме соответствуют номинальные параметры: вращающий момент M_n , скольжение S_n и частота вращения n_{2n} (рис. 68).

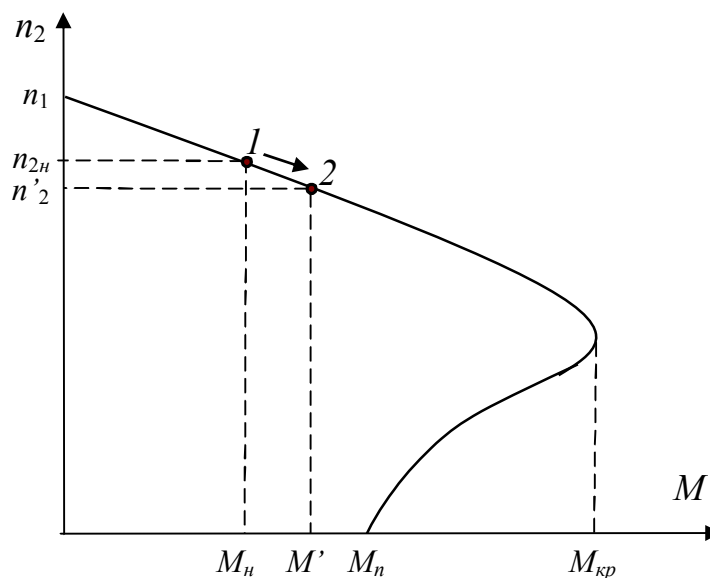


Рис. 68. Увеличение вращающего момента при возрастании нагрузки на валу двигателя

При увеличении нагрузки на валу двигателя частота вращения ротора n_2 уменьшается, следовательно, скольжение S согласно формуле (165) возрастет. Увеличение скольжения согласно формуле (167) приведет к увеличению ЭДС ротора E_2 , вследствие чего увеличится и ток ротора I_2 . В соответствии с уравнением (164) $M = C \cdot \Phi \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2$. Поэтому увеличение тока ротора приведет к увеличению вращающего момента, который в установившемся режиме уравнивает момент нагрузки на валу.

Таким образом, на увеличение момента нагрузки двигатель ответит увеличением вращающего момента при меньшей частоте вращения ротора. Установится новое состояние равновесия. Рабочая точка на механической характеристике переместится из положения 1 в положение 2 (см. рис. 68), которому соответствуют вращающий момент $M' > M_n$, скольжение $S' > S_n$ и частота вращения $n'_2 < n_{2n}$.

4.7. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей

Один из способов регулирования частоты вращения асинхронных двигателей – *введение добавочных сопротивлений в цепь фазного ротора*. Частота вращения ротора при этом уменьшается (рис. 69). Регулирующими сопротивлениями могут быть пусковые сопротивления (см. рис. 67).

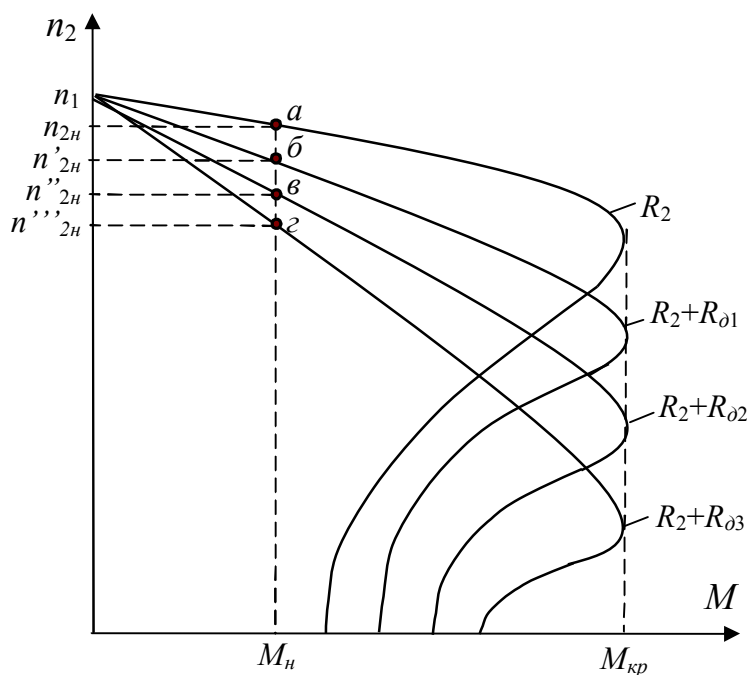


Рис. 69. Механические характеристики при регулировании частоты вращения введением в цепь ротора регулировочных сопротивлений ($R_{\partial 3} > R_{\partial 2} > R_{\partial 1}$)

Этот способ имеет недостатки:

- 1) значительные потери мощности в добавочных сопротивлениях;
- 2) с введением добавочных сопротивлений уменьшается жесткость механической характеристики;
- 3) процесс регулирования осуществляется только в сторону уменьшения частоты вращения от номинального значения;
- 4) процесс регулирования ступенчатый.

Этот метод может применяться только для асинхронных двигателей с фазным ротором.

Другой способ регулирования частоты вращения заключается в изменении числа пар полюсов, что в соответствии с формулой (161)

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} \text{ приводит к изменению частоты вращения магнитного поля и,}$$

следовательно, к изменению частоты вращения ротора. Изменение числа пар полюсов осуществляется изменением схемы соединения секций фаз обмотки статора.

Этот способ обычно применяется для многоскоростных двигателей специального назначения с короткозамкнутым ротором. Многоскоростными называются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, допускающие пересоединение катушек в каждой фазе обмотки статора.

Промышленностью выпускаются двухскоростные, трехскоростные асинхронные двигатели: 750/1500, 500/1000, 750/1500/3000 $\left[\frac{\text{об}}{\text{мин}} \right]$.

У таких двигателей процесс регулирования осуществляется ступенчато без снижения жесткости механической характеристики (рис. 70).

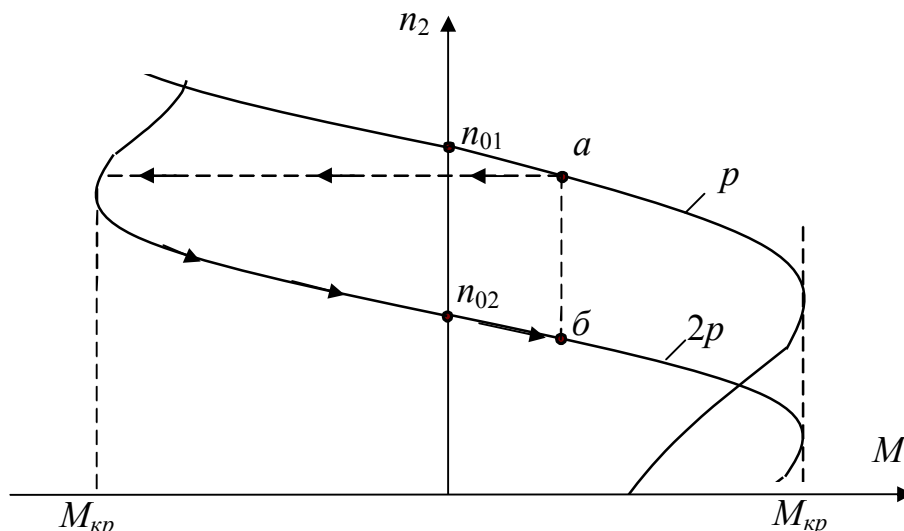


Рис. 70. Механические характеристики двухскоростного асинхронного двигателя (стрелками показан переход двигателя из режима работы в точке а в режим работы в точке б)

Недостатки данного способа регулирования:

- 1) процесс регулирования ступенчатый;
- 2) при одних и тех же габаритах большей частоте вращения соответствует большая номинальная мощность; при снижении частоты вращения значительно снижаются номинальная мощность двигателя и его технические показатели ($\eta_n, \cos\varphi_n$).

Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя возможно и *изменением частоты питающего напряжения f_1* .

При этом также в соответствии с формулой (161) изменяется частота вращения магнитного поля.

При уменьшении f_1 (частоты тока I_1) магнитный поток возрастает, токи в обмотке увеличиваются, а КПД и $\cos\varphi_1$ снижаются. Для сохранения неизменной величины магнитного потока при частотном регулировании осуществляется одновременное пропорциональное изменение как частоты тока I_1 , так и амплитуды фазных напряжений (рис. 71). При этом $M_{кр}$ двигателя остается почти неизменным, незначительно снижаясь с уменьшением f_1 (см. рис. 71).

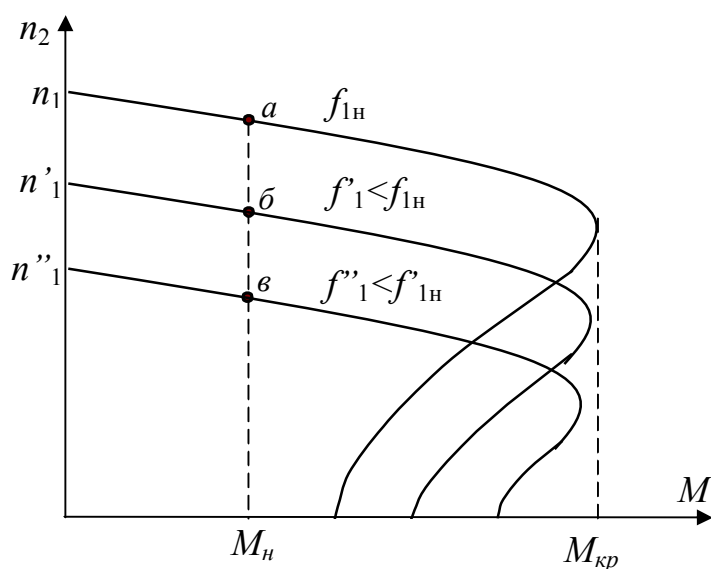


Рис. 71. Механические характеристики при изменении частоты тока в цепи статора

В настоящее время для частотного регулирования используются специальные статические преобразователи частоты на тиристорах, позволяющие плавно регулировать частоту вращения асинхронных двигателей в широких пределах.

4.8. Коэффициент полезного действия асинхронного двигателя

Коэффициент полезного действия (КПД) асинхронного двигателя показывает, какую часть составляет полезная мощность на валу двигателя от мощности, потребляемой двигателем из сети.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\%, \quad (179)$$

где P_1 – активная мощность, потребляемая двигателем из сети; P_2 – активная полезная мощность на валу двигателя, которая отдается производственному механизму.

Активная мощность P_1 определяет среднюю мощность необратимого преобразования в двигателе электрической энергии, получаемой из трехфазной сети, в механическую, тепловую и другие виды энергии.

$$P_1 = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi_1. \quad (180)$$

Суммарные потери мощности в двигателе при преобразовании электрической энергии в полезную механическую

$$\sum \Delta P = P_1 - P_2. \quad (181)$$

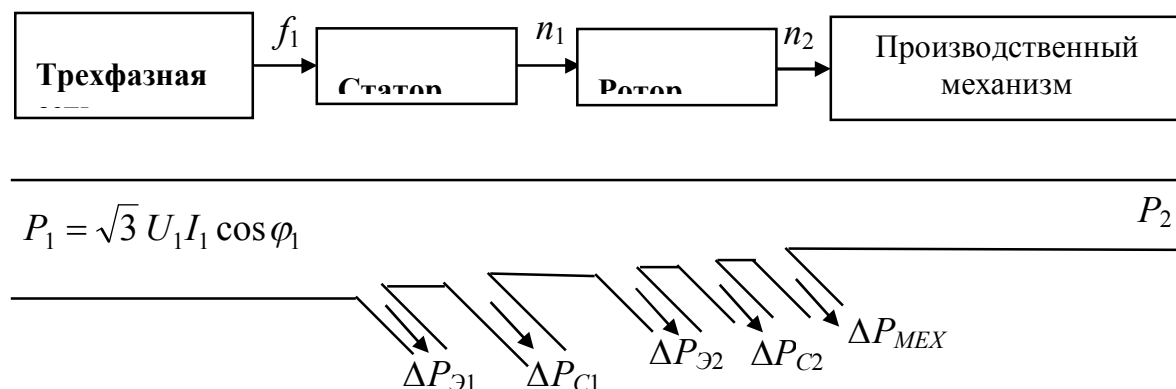


Рис. 72. Схема связей между частями машинного устройства и диаграмма мощностей асинхронного двигателя

На диаграмме (рис. 72) показаны потери мощности в двигателе:

$\Delta P_{Э1}$, $\Delta P_{Э2}$ – электрические потери, вызванные нагревом проводов обмоток статора и ротора; эти потери переменные, так как их величина

зависит от нагрузки на валу двигателя и пропорциональна квадрату тока обмоток статора и ротора:

$$\Delta P_{\Sigma 1} \approx 7,5\% \cdot P_1; \quad \Delta P_{\Sigma 2} \approx 4,5\% \cdot P_1; \quad (172)$$

ΔP_{C1} , ΔP_{C2} – потери в стали машины, т.е. потери, обусловленные перемагничиванием сердечников статора и ротора, причем потери ΔP_{C2} в сердечнике ротора очень малы и практически не учитываются; потери в сердечнике статора

$$\Delta P_{C1} \approx 1,5\% \cdot P_1; \quad (173)$$

ΔP_{MEX} – механические потери, обусловленные трением ротора в подшипниках, и вентиляционные потери:

$$\Delta P_{MEX} \approx (2-4)\% \cdot P_1. \quad (174)$$

Наибольшее значение КПД достигает при номинальной нагрузке (рис. 73).

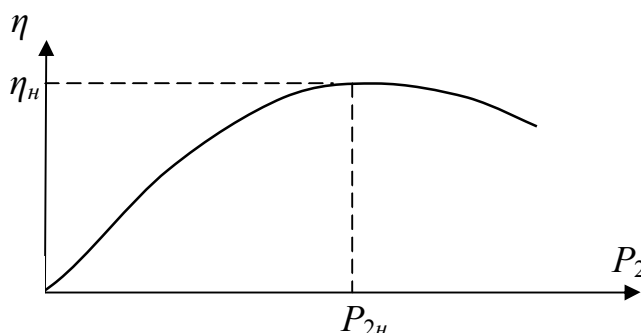


Рис. 73. Зависимость коэффициента полезного действия от нагрузки на валу асинхронного двигателя

КПД современных трехфазных асинхронных двигателей в номинальном режиме составляет 80–95%.

4.9. Коэффициент мощности асинхронного двигателя

Кроме необратимого процесса расхода энергии, учитываемого величиной активной мощности P_1 , в асинхронном двигателе происходит обратимый процесс периодического изменения запаса энергии магнитного поля.

Коэффициент мощности асинхронного двигателя

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}} \quad (185)$$

зависит от нагрузки на валу двигателя.

В режиме холостого хода энергия расходуется в основном только на покрытие небольших потерь мощности в статоре и незначительных механических потерь. Энергия, запасенная во вращающемся магнитном поле, практически не зависит от расхода энергии на совершение полезной

механической работы и нагрев двигателя, т.е. реактивная мощность не зависит от нагрузки на валу. Таким образом, в режиме холостого хода двигателя активная мощность мала, а реактивная велика, поэтому

$$\cos\varphi_{1XX}=0,08-0,15. \quad (186)$$

С увеличением нагрузки на валу двигателя активная мощность растет, а реактивная остается постоянной. Следовательно, коэффициент мощности увеличивается. При номинальной нагрузке

$$\cos\varphi_{1H}=0,75-0,95. \quad (187)$$

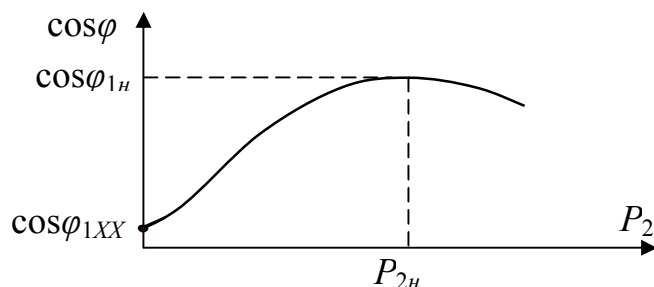


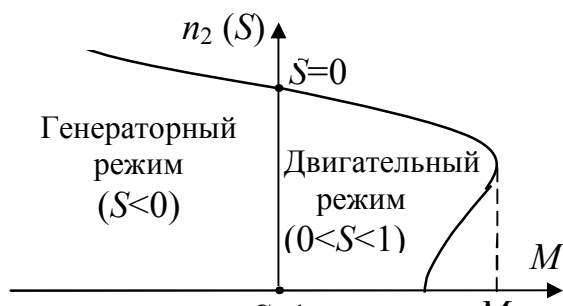
Рис. 74. Зависимость коэффициента мощности от нагрузки на валу асинхронного двигателя

Однако при дальнейшем увеличении тормозного момента на валу происходит существенный рост токов в обмотках статора и ротора, что приводит к возрастанию реактивной мощности и, как следствие, к снижению коэффициента мощности (рис. 74).

4.10. Генераторные и тормозные режимы работы асинхронного двигателя

4.10.1. Генераторный режим с отдачей энергии в сеть

При генераторном (рекуперативном) режиме с отдачей энергии в сеть ротор двигателя вращается с частотой, большей синхронной ($n_2 > n_1$) в направлении вращения магнитного поля статора, т.е. $S < 0$ (рис. 75). Следовательно, направление, в котором силовые линии магнитного поля пересекают обмотку ротора, противоположно по сравнению с направлением, когда асинхронная машина работает в режиме двигателя. При этом ЭДС E_2 и ток I_2 в обмотке ротора изменяют фазу на 180° , что согласно уравнению (164) вызывает изменение направления действия вращающего момента, который оказывается направленным против вращения ротора. Изменение направления действия вращающего момента, фазы тока ротора I_2 на 180° , а следовательно, и фазы активной составляющей тока статора I_1 на 180° означает переход машины в режим генератора, когда механическая энергия, поступающая извне на вал ротора, преобразуется в электрическую и



отдается в сеть. Однако при этом асинхронная машина потребляет из сети реактивную энергию, так как вращающееся магнитное поле машины создается реактивной (индуктивной) составляющей тока I_1 . Это

Такой режим имеет место при работе двигателя в грузоподъемных механизмах при спуске легких грузов или при переключении числа пар полюсов многоскоростного двигателя с большей частоты вращения на меньшую. При этом частота вращения ротора не может измениться мгновенно. Например, при переключении с $n_1 = 1500 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ на $n_1 = 750 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ ротор некоторое время будет вращаться с частотой $n_2 > n_1 = 750 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$.

В этом режиме скольжение и электромагнитный момент будут отрицательными, т.е. электромагнитный момент становится тормозным, а вращение ротора происходит за счет сторонних сил.

4.10.2. Режим торможения противовключением

В режиме торможения противовключением ротор вращается в сторону, противоположную вращению магнитного поля статора. В этом режиме $S > 1$.

Режим противовключения может возникнуть у двигателя, работающего в грузоподъемных механизмах, при спуске тяжелых грузов. При этом двигатель включен на подъем, но под действием веса груза ротор двигателя вращается в обратную сторону. Этот режим называется режимом электромагнитного тормоза (рис. 76).

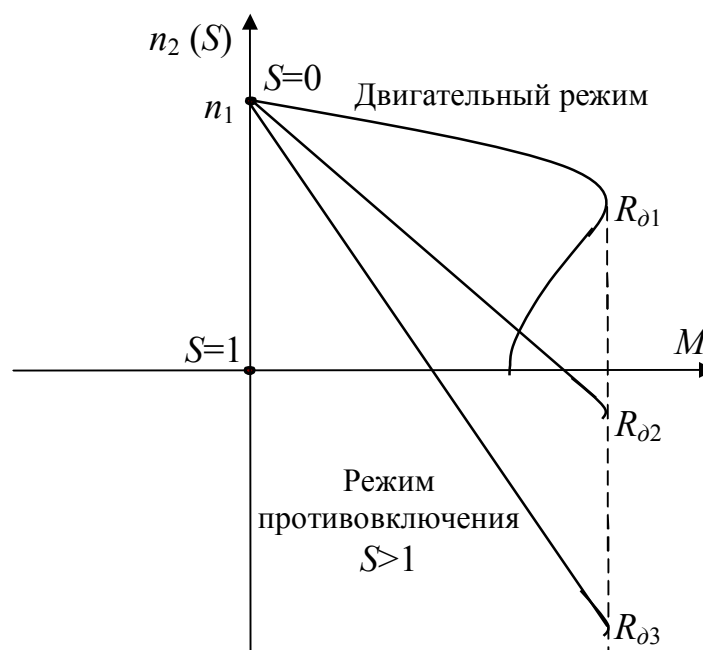


Рис. 76. Механические характеристики асинхронного двигателя в режиме противовключения ($R_{\partial 3} > R_{\partial 2} > R_{\partial 1}$)

В режиме противовключения $S > 1$, следовательно (так как $E_2 = E_{2\kappa} \cdot S$), ЭДС, наводимая в роторе, увеличивается по отношению к двигательному режиму. При этом в цепь ротора вводят добавочные сопротивления, уменьшающие ток ротора.

4.11. Пример расчета режима работы

трехфазного асинхронного двигателя

Номинальная мощность трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором $P_{2н} = 10$ кВт; номинальное напряжение $U_n = 380$ В; номинальная частота вращения ротора $n_{2н} = 1420 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$; номинальный коэффициент полезного действия $\eta_n = 0,84$; номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi_n = 0,85$; кратность пускового тока $\frac{I_n}{I_n} = 6,5$; перегрузочная способность двигателя по моменту $\lambda = 1,8$.

Определить: мощность, подводимую к двигателю $P_{1н}$; номинальный M_n и максимальный $M_{кр}$ моменты двигателя; пусковой ток двигателя I_n ; номинальное S_n и критическое $S_{кр}$ скольжение. Рассчитать и построить механическую характеристику двигателя $n_2 = f(M)$.

Решение.

1. Мощность, подводимая к двигателю,

$$P_{1н} = \frac{P_{2н}}{\eta_n} = \frac{10}{0,84} = 11,9 \text{ кВт.}$$

2. Номинальный момент двигателя

$$M_n = \frac{9550 \cdot P_{2н}}{n_{2н}} = \frac{9550 \cdot 10}{1420} = 67,3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

3. Максимальный (критический) момент

$$M_{кр} = \lambda \cdot M_n = 1,8 \cdot 67,3 = 121 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

4. Номинальный ток

$$I_{1н} = \frac{P_{1н}}{\sqrt{3}U_{1н} \cdot \cos\varphi_{1н}} = \frac{11,9 \cdot 1000}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,84} = 21,2 \text{ А}.$$

5. Пусковой ток двигателя

$$I_n = 6,5 \cdot I_{1н} = 6,5 \cdot 21,2 = 138 \text{ А}.$$

6. Номинальное скольжение

$$S_n = \frac{n_{1н} - n_{2н}}{n_{1н}} = \frac{1500 - 1420}{1500} = 0,053.$$

7. Критическое скольжение

$$S_{кр} = S_n \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right) = 0,053 \left(1,8 + \sqrt{1,8^2 - 1} \right) = 0,175.$$

8. Рассчитаем и построим механические характеристики двигателя $M=f(S)$ и $n_2 = f(M)$ (рис. 77).

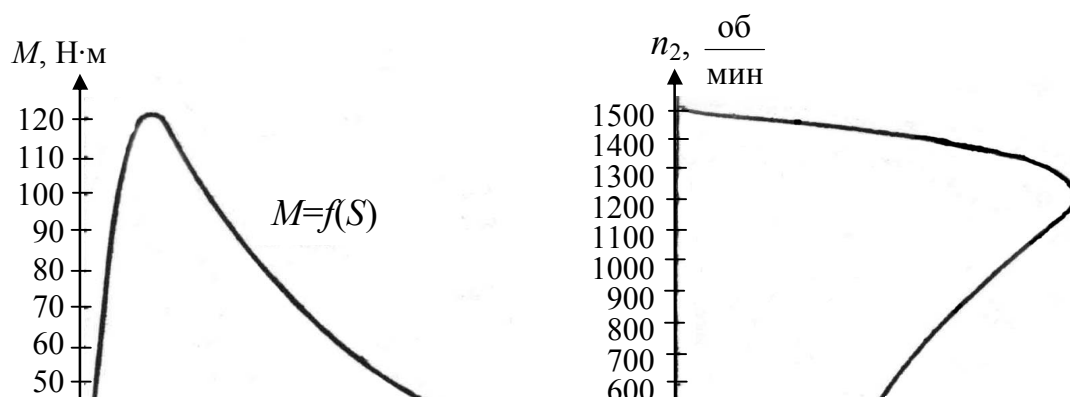
Задаваясь скольжением S от 0 до 1, рассчитаем вращающий момент и частоту вращения двигателя в соответствии с уравнениями:

$$M = \frac{\frac{2M_{кр}}{S_{кр}} \cdot \frac{S}{S}}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S}{S_{кр}}} = \frac{242}{\frac{0,175}{S} + \frac{S}{0,175}}; \quad n_2 = n_1 \cdot (1 - S).$$

Расчетные данные приведены в табл. 3.

Таблица 3

S	n_2 , об/мин	M , Н·м
0	1500	0
0,053	1420	67,3
0,1	1350	104,3
0,175	1238	121,0
0,2	1200	120,5
0,3	1050	105,3
0,4	900	88,8
0,5	750	75,5
0,6	600	65,2
0,7	450	57,0
0,8	300	50,5
0,9	150	45,5
1,0	0	41,2



Контрольные вопросы по асинхронным двигателям

1. Асинхронным двигатель называется потому, что:

- 1) поле статора опережает при своем вращении ротор;
- 2) поле статора отстает от поля ротора;
- 3) поле статора и поле ротора совпадают;
- 4) поле статора находится в противофазе с полем ротора.

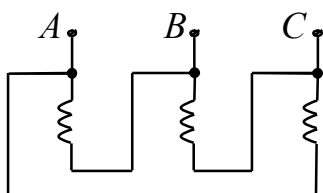
2. Каким образом следует соединить обмотку статора асинхронного трехфазного двигателя при его подключении к сети, если в его паспорте указано напряжение 220 В, а напряжение сети 220/380 В?

- 1) на данное напряжение включить нельзя;
- 2) «треугольником»;
- 3) «звездой»;
- 4) безразлично, по какой схеме.

3. Как изменится ЭДС обмоток ротора E_2 от момента запуска двигателя до набора оборотов холостого хода?

- 1) уменьшится;
- 2) увеличится;
- 3) останется неизменной.

4. Каким способом соединены обмотки статора асинхронного двигателя?



- 1) «звездой» без нейтрального провода;
- 2) «звездой» с нейтральным проводом;
- 3) «треугольником».

5. Ротор четырехполюсного асинхронного двигателя, подключенного к сети трехфазного тока с частотой $f=50$ Гц, вращается с частотой $n_2=1440$ об/мин. Чему равно скольжение?

- 1) 0,04; 2) 0,1; 3) 0,02; 4) 0,08.

6. Как изменится скольжение асинхронного двигателя при изменении нагрузки на валу от 0 до M_n ?

- 1) увеличится; 2) уменьшится; 3) останется неизменным.

7. Будет ли работать трехфазный асинхронный двигатель при обрыве электрической цепи ротора?

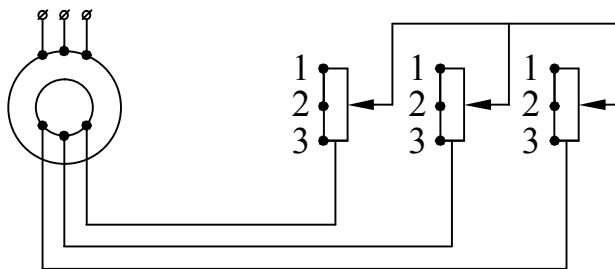
- 1) нет, так как в обмотке ротора не будет ЭДС;
2) нет, так как в обмотке ротора не будет тока;
3) будет.

8. Каким образом можно увеличить пусковой момент асинхронного двигателя с фазным ротором?

- 1) применить ротор с двойной «беличьей клеткой»;
2) применить ротор с глубоким пазом;
3) увеличить количество фаз;
4) ввести пусковые реостаты в цепь обмотки ротора.

9. В каком положении находится скользящий контакт пускового реостата во время пуска асинхронного двигателя? Указать номер положения:

- 1) 1;
2) 2;
3) 3.



10. Какое из перечисленных уравнений используется для расчета номинального момента асинхронного двигателя?

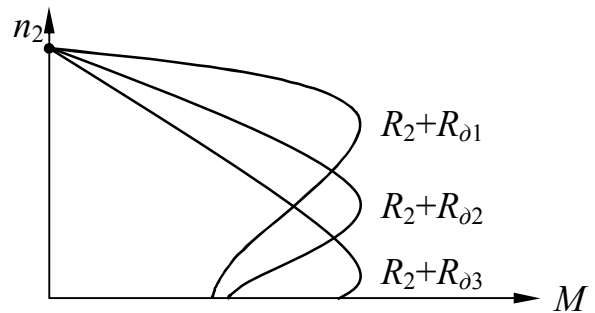
- 1) $M = \frac{9550 \cdot P_2}{n_2}$; 2) $M = \frac{2 \cdot M_{кр}}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S}}$; 3) $S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$.

11. В каких соотношениях находятся величины добавочных сопротивлений, включенных в цепь ротора асинхронного двигателя, на приведенных графиках механических характеристик?

1) $R_{\partial 1} > R_{\partial 2} > R_{\partial 3}$;

2) $R_{\partial 1} = R_{\partial 2} = R_{\partial 3}$;

3) $R_{\partial 1} < R_{\partial 2} < R_{\partial 3}$.



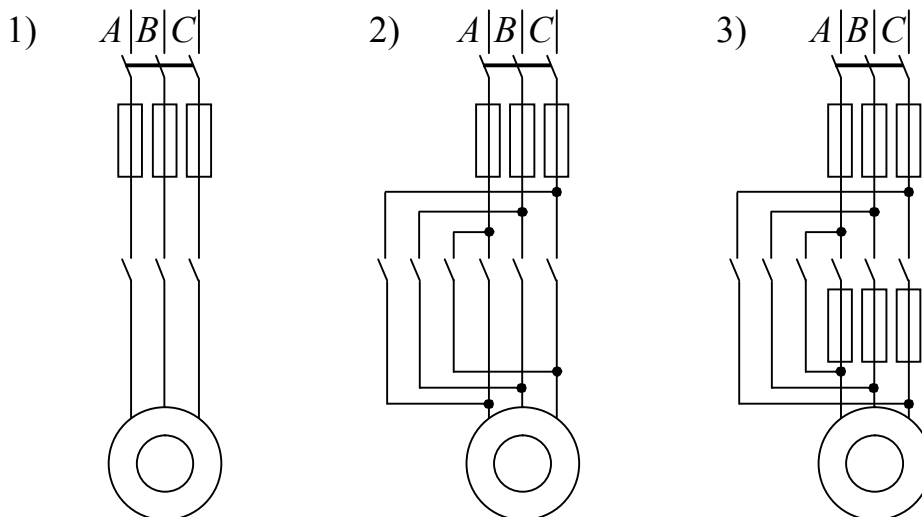
12. Какое из перечисленных уравнений соответствует уравнению механической характеристики асинхронного двигателя?

1) $M = \frac{9550 \cdot P_2}{n_2}$; 2) $S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$; 3) $M = \frac{2M_{кр}}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S}}$.

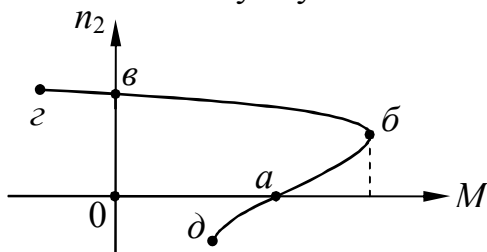
13. Как изменить направление вращения вращающегося магнитного поля асинхронного двигателя?

- 1) изменить частоту трехфазного тока;
- 2) поменять местами два любых провода, подводящих к двигателю трехфазное питающее напряжение;
- 3) поменять местами все три провода трехфазной сети.

14. Какая из приведенных схем позволяет осуществить реверс асинхронного двигателя?

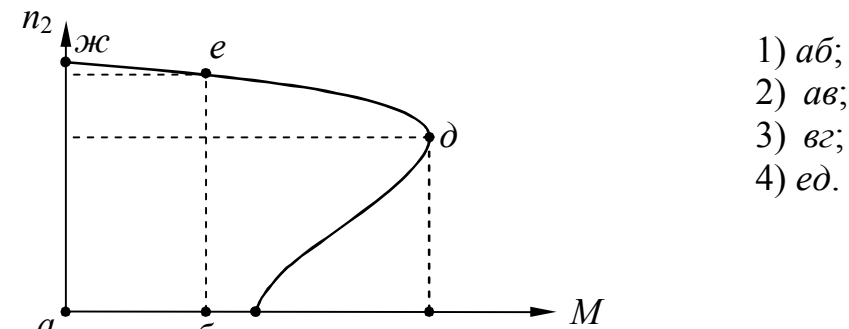


15. Какой участок механической характеристики асинхронного двигателя соответствует устойчивой работе в двигательном режиме?



- 1) аб;
- 2) вг;
- 3) бв;
- 4) ад.

16. Каким отрезком на графике механической характеристики асинхронного двигателя определяется величина пускового момента двигателя?



17. Как изменится скольжение асинхронного двигателя, если уменьшить тормозной момент на его валу?

1) не изменится; 2) увеличится; 3) уменьшится; 4) для ответа на вопрос недостаточно данных.

18. С какой целью при пуске двигателя в цепь обмотки ротора с контактными кольцами вводят добавочное сопротивление?

- 1) для уменьшения пускового момента и пускового тока;
- 2) для уменьшения времени разбега;
- 3) для уменьшения пускового тока и увеличения пускового момента;
- 4) для увеличения тока холостого хода.

19. При регулировании частоты вращения асинхронного трехфазного двигателя с фазным ротором были получены следующие частоты вращения: 1475; 1450; 1425; 1400 об/мин. Каким способом осуществлялось регулирование частоты вращения?

- 1) за счет изменения числа пар полюсов;
- 2) за счет изменения сопротивления в цепи ротора.

20. При регулировании частоты вращения асинхронного двигателя были получены следующие частоты вращения: 1500; 1000; 750 об/мин. Каким способом осуществлялось регулирование частоты вращения?

- 1) введением в цепь ротора регулировочных сопротивлений;
- 2) введением в цепь статора сопротивлений;
- 3) изменением числа пар полюсов двигателя.

21. Как изменится коэффициент мощности асинхронного двигателя при переходе двигателя от режима холостого хода к номинальной нагрузке на валу?

- 1) не изменится; 2) уменьшится; 3) увеличится.

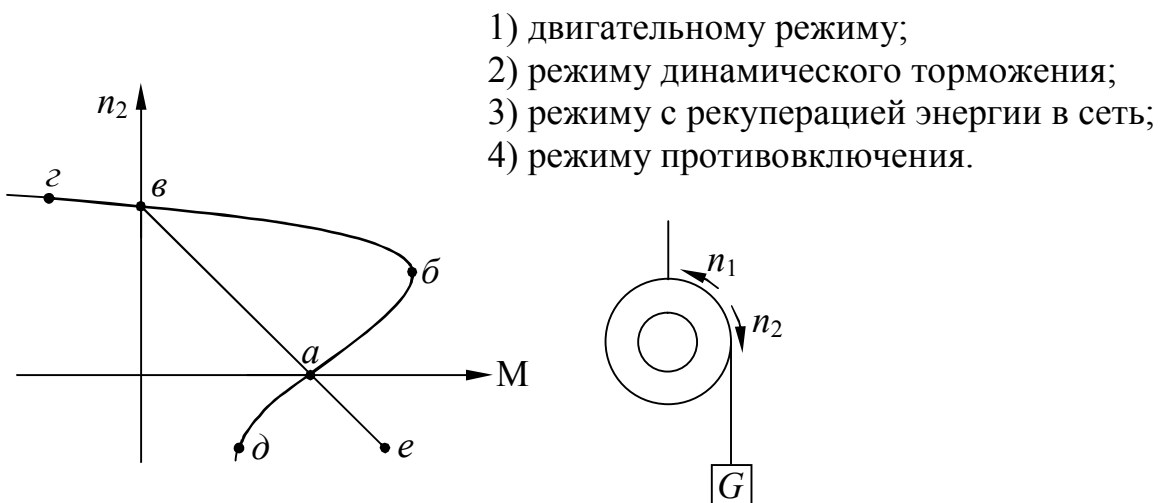
22. Как зависит коэффициент мощности $\cos\varphi$ асинхронного двигателя от нагрузки на валу?

- 1) $\cos\varphi$ растет с уменьшением нагрузки;
- 2) $\cos\varphi$ растет с увеличением нагрузки;
- 3) $\cos\varphi$ не зависит от нагрузки.

23. При какой нагрузке КПД двигателя достигает максимума?

- 1) номинальной;
- 2) равной примерно половине номинальной;
- 3) несколько больше номинальной.

24. Какому режиму работы двигателя соответствует участок «ae» на механической характеристике асинхронного двигателя?



25. Чему равна сумма потерь мощности электрического двигателя при КПД $\eta=85\%$, если двигатель потребляет мощность $P_{1н}=30$ кВт?

- 1) 3,0 кВт; 2) 1,5 кВт; 3) 4,5 кВт; 4) 0,5 кВт.

Задание на самостоятельную работу по асинхронным двигателям

Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, номинальная мощность которого $P_{2н}$, включен в сеть на номинальное напряжение U_n частотой $f=50$ Гц.

Определить номинальный I_n и пусковой I_n токи; номинальный M_n , пусковой M_n и максимальный $M_{кр}$ моменты; полные потери мощности в двигателе при номинальной нагрузке ΔP_n . Как изменится пусковой момент двигателя при снижении напряжения на его зажимах на 15% и возможен ли пуск двигателя при этих условиях с номинальной нагрузкой? Построить механическую характеристику двигателя. Данные для расчета приведены в табл. 4.

Таблица 4

Номер вариан та	Данные для расчета								
	U_n , В	P_{2n} , кВт	S_n , %	η_n	$\cos\varphi_n$	p	$\frac{M_{кр}}{M_n}$	$\frac{M_n}{M_n}$	$\frac{I_n}{I_n}$
1	220	0,8	3,0	0,78	0,86	1	2,2	1,9	7,0
2	220	0,1	3,0	0,795	0,87	1	2,2	1,9	7,0
3	220	1,5	4,0	0,8	0,88	1	2,2	1,8	7,0

Окончание табл. 4

Номер вариан та	Данные для расчета								
	U_n , В	P_{2n} , кВт	S_n , %	η_n	$\cos\varphi_n$	p	$\frac{M_{кр}}{M_n}$	$\frac{M_n}{M_n}$	$\frac{I_n}{I_n}$
4	220	2,2	4,5	0,5	0,89	1	2,2	1,8	7,0
5	220	3,0	3,5	0,83	0,89	1	2,2	1,7	7,0
6	220	4,0	2,0	0,845	0,89	1	2,2	1,7	7,0
7	220	5,5	3,0	0,855	0,89	1	2,2	1,7	7,0
8	220	7,5	3,5	0,86	0,89	1	2,2	1,6	7,0
9	220	10	4,0	0,87	0,89	1	2,2	1,5	7,0
10	220	13	3,5	0,88	0,89	1	2,2	1,5	7,0
11	220	17	3,5	0,88	0,90	1	2,2	1,2	7,0
12	220	22	3,5	0,88	0,90	1	2,2	1,1	7,0
13	220	30	3,0	0,89	0,90	1	2,2	1,01	7,0
14	220	40	3,0	0,90	0,91	1	2,2	1	7,0
15	220	55	3,0	0,90	0,92	1	2,2	1	7,0
16	220	75	3,0	0,915	0,92	1	2,2	1	7,0
17	220	100	2,5	0,885	0,92	1	2,2	1	7,0
18	380	10	3,0	0,89	0,87	2	2,0	1,4	7,0
19	380	13	3,0	0,90	0,89	2	2,0	1,4	7,0
20	380	17	3,0	0,91	0,89	2	2,0	1,3	7,0
21	380	22	3,0	0,925	0,90	2	2,0	1,3	7,0
22	380	30	3,0	0,925	0,91	2	2,0	1,2	7,0
23	380	40	3,0	0,925	0,92	2	2,0	1,2	7,0
24	380	55	3,0	0,925	0,92	2	2,0	1,1	7,0
25	380	75	3,0	0,925	0,92	2	2,0	1,1	7,0

5. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Машины постоянного тока являются обратимыми машинами, т.е. они могут работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя.

Двигатели постоянного тока имеют преимущества перед двигателями переменного тока:

- 1) плавное регулирование частоты вращения;
- 2) большой пусковой момент.

Поэтому двигатели постоянного тока применяются в качестве тяговых двигателей на электротранспорте. Например, мощность двигателя трамвая составляет 40–45 кВт при напряжении питания 550 В; мощность двигателя электровоза или пригородного поезда составляет 150–200 кВт при напряжении питания 1500 В.

Мощность двигателей постоянного тока может быть от долей ватта (в схемах автоматики) до тысяч кВт (в прокатных станах).

По сравнению с машинами переменного тока машины постоянного тока:

- 1) имеют более сложную конструкцию и поэтому более дорогие;
- 2) являются более сложными в эксплуатации.

5.1. Устройство машин постоянного тока

В состав машины постоянного тока входят (рис. 78):

- 1) индуктор (статор);
- 2) якорь;
- 3) щеточно-коллекторное устройство.

Индуктор – это неподвижная часть, предназначенная для создания магнитного поля машины (рис. 79), которое образуется за счет полюсных наконечников, представляющих собой электромагниты постоянного тока. На полюсных наконечниках расположены образующие обмотку возбуждения катушки, соединенные последовательно так, чтобы полюсы N и S чередовались.

Рассмотрим распределение магнитной индукции в зазоре вдоль поверхности якоря. Наибольшее значение индукция имеет под полюсами, между полюсами она равна нулю. Плоскости, проходящие между смежными полюсами, называются *геометрическими нейтралями*, а часть окружности между геометрическими нейтралями – *полюсным делением*.

Якорь – это вращающаяся часть машины (см. рис 78). Сердечник якоря собирается из листов электротехнической стали, имеющих вид дисков с вырезами, образующими при сборке пазы. В пазы укладывается обмотка, разделенная на секции. Витки одной секции соединяются с двумя пластинами, расположенными диаметрально противоположно. Пластины

выполнены из меди и расположены по окружности якоря, образуя коллектор. Пластины изолированы друг от друга.

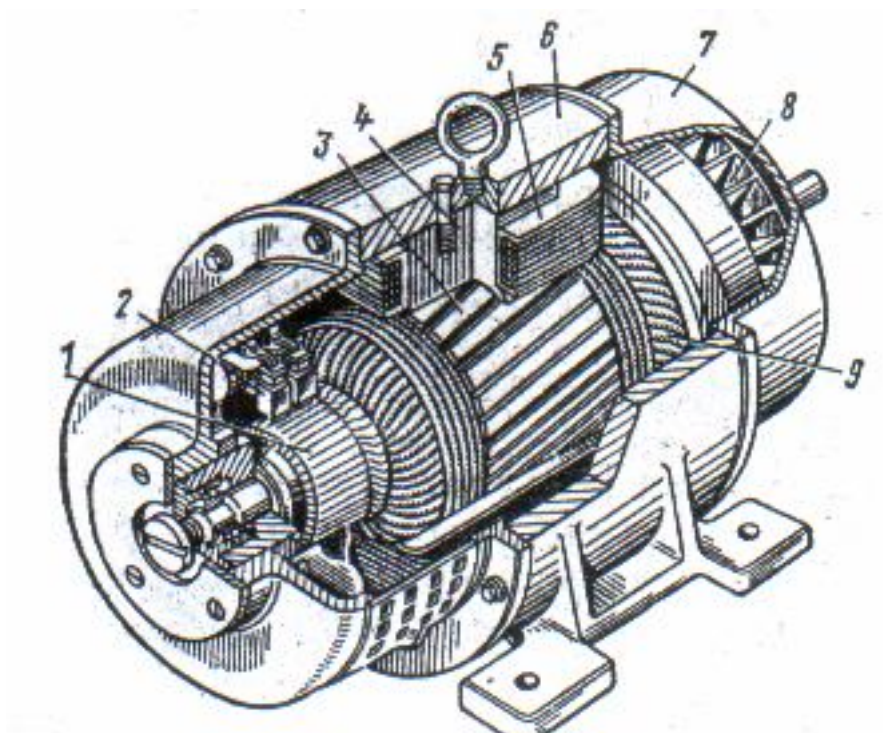


Рис. 78. Устройство машины постоянного тока:
 1 – коллектор; 2 – щетки; 3 – сердечник якоря;
 4 – сердечник главного полюса; 5 – полюсная
 катушка; 6 – индуктор; 7 – подшипниковый щит;
 8 – вентилятор; 9 – обмотка якоря

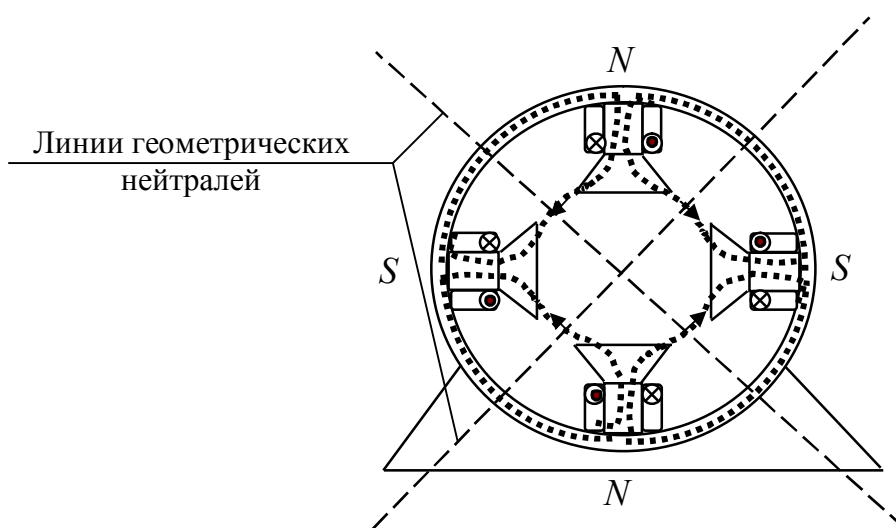


Рис. 79. Индуктор машины постоянного тока

Щеточно-коллекторное устройство осуществляет скользящий контакт обмотки якоря с внешней цепью. При вращении якоря по коллектору скользят две графитовые щетки (см. рис. 78), установленные в специальные обоймы щеткодержателей диаметрально противоположно. Щетки прижимаются к коллектору спиральными или пластинчатыми пружинами. Щеткодержатели крепятся к траверсе, которую вместе со щетками можно поворачивать относительно индуктора на некоторый угол в ту или иную сторону.

5.2. Принцип действия машин постоянного тока в различных режимах работы

5.2.1. Режим двигателя

Принцип действия двигателей постоянного тока основан на возникновении механической силы, действующей на проводник с током, помещенный в магнитное поле.

При подаче на обмотки якоря и возбуждения напряжения по этим обмоткам протекает ток. Ток обмотки возбуждения создает магнитное поле машины (магнитный поток Φ). Взаимодействие тока якоря $I_{\text{я}}$ с этим магнитным полем приводит к возникновению вращающего момента

$$M = C_m \Phi I_{\text{я}}, \quad (188)$$

где C_m – постоянный коэффициент по моменту, зависящий от конструкции машины.

При вращении якоря в магнитном поле в обмотке якоря наводится ЭДС

$$E = C_e \Phi n, \quad (189)$$

где C_e – постоянный коэффициент по ЭДС, зависящий от конструкции машины; Φ – магнитный поток; n – частота вращения якоря.

В режиме двигателя эта ЭДС направлена противоположно по отношению к приложенному напряжению (противо-ЭДС). Поэтому уравнение электрического состояния цепи якоря имеет вид

$$U = E + I_{\text{я}} R_{\text{я}}, \quad (190)$$

или

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E}{R_{\text{я}}}, \quad (191)$$

где $R_{\text{я}}$ – сопротивление якоря.

Из уравнения (191) видно, что ток якоря зависит не только от напряжения, но и от ЭДС. В режиме двигателя $U_{\text{я}} > E$.

5.2.2. Режим генератора

Для получения режима генератора необходимо привести во вращение якорь машины постоянного тока. При вращении якоря в магнитном поле в обмотке якоря наводится ЭДС

$$E = C_e \Phi n. \quad (192)$$

Магнитный поток Φ зависит от величины тока возбуждения I_e . При подключении к обмотке якоря нагрузки напряжение на выходе генератора всегда меньше ЭДС якоря на величину падения напряжения в самом якоре $I_a R_a$.

Уравнение электрического состояния цепи якоря в режиме генератора имеет вид

$$U = E - I_a R_a. \quad (193)$$

Взаимодействие тока якоря с магнитным полем машины приводит к появлению электромагнитного момента, который в режиме генератора будет тормозным.

5.3. Реакция якоря

С увеличением электрической нагрузки на генератор и механической нагрузки на двигатель возрастает ток якоря.

Реакция якоря – это воздействие тока якоря на систему возбуждения машины. При этом происходит искажение магнитного поля машины, проявляющееся обычно в уменьшении магнитного потока машины Φ .

Действие реакции якоря обуславливает необходимость увеличения тока возбуждения с ростом нагрузки для того, чтобы поддерживать неизменным магнитный поток машины Φ .

Для уменьшения реакции якоря машины постоянного тока снабжаются дополнительными полюсами, которые устанавливаются на станине машины по линии геометрической нейтрали. Обмотки дополнительных полюсов соединяются через щетки последовательно с обмоткой якоря так, чтобы направление вектора напряженности магнитного поля от дополнительных полюсов было противоположно направлению вектора напряженности магнитного поля, возникающего из-за реакции якоря. Тем самым компенсируется действие реакции якоря.

Так как магнитное поле дополнительных полюсов создается током якоря, компенсация реакции якоря происходит автоматически при любых нагрузках машины.

5.4. Классификация машин постоянного тока по способу возбуждения

В зависимости от способа соединения обмотки якоря с обмоткой возбуждения различают машины постоянного тока:

- с независимым возбуждением;
- с параллельным возбуждением;
- с последовательным возбуждением;
- со смешанным возбуждением.

Иногда в машинах постоянного тока малой мощности вместо обмоток возбуждения используются постоянные магниты.

5.5. Характеристики двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением

Электрическая принципиальная схема двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением изображена на рис. 80. Напряжение U приложено одновременно к обмотке якоря и обмотке возбуждения.

$$U = U_{\text{я}}. \quad (194)$$

Параллельная обмотка возбуждения выполняется тонким проводом со значительным числом витков.

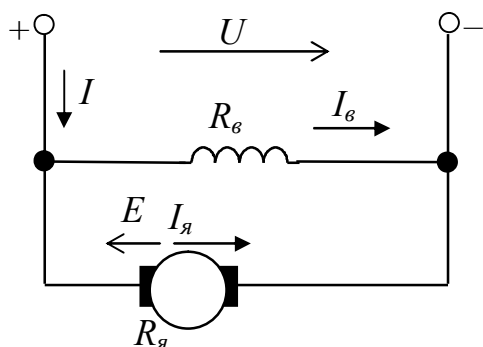


Рис. 80. Электрическая принципиальная схема двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением

При поданном на обмотки якоря и возбуждения напряжении U по этим обмоткам протекают токи $I_{\text{я}}$ и $I_{\text{в}}$ соответственно.

Согласно первому закону Кирхгофа

$$I = I_{\text{я}} + I_{\text{в}}. \quad (195)$$

С учетом условия (184) уравнение электрического состояния цепи якоря (180) примет вид

$$U = E + I_{\text{я}} R_{\text{я}}, \quad (196)$$

или

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E}{R_{\text{я}}}. \quad (197)$$

Ток обмотки возбуждения

$$I_{\text{в}} = \frac{U}{R_{\text{в}}} \quad (198)$$

создает магнитный поток Φ машины.

Скоростной характеристикой двигателя называется зависимость частоты вращения якоря от тока якоря $n = f_1(I_{\text{я}})$.

Из уравнений (189) и (196) имеем

$$n = \frac{U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{C_e \Phi}, \quad (199)$$

или

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{C_e \Phi}. \quad (200)$$

Уравнение (200) является уравнением скоростной характеристики двигателя (рис. 81).

С позиций электропривода одним из показателей свойств двигателя является его механическая характеристика.

Механической характеристикой двигателя называется зависимость частоты вращения якоря от вращающего момента $n=f_2(M)$.

Уравнение (200) с учетом (188) запишется в виде

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{M R_{\text{я}}}{C_e C_m \Phi^2}. \quad (201)$$

Уравнение (201) является уравнением механической характеристики двигателя (рис. 82).

Отношение двух постоянных C_e и C_m равно

$$\frac{C_e}{C_m} = 0,105. \quad (202)$$

После подстановки из уравнения (202) в (201) имеем

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{0,105 M R_{\text{я}}}{(C_e \Phi)^2}, \quad (203)$$

где $n_0 = \frac{U}{C_e \Phi}$ – частота вращения идеального холостого хода;

$\Delta n = \frac{0,105 M R_{\text{я}}}{(C_e \Phi)^2}$ – уменьшение частоты вращения при увеличении нагрузочного момента.

Механическая характеристика двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением строится по двум точкам:

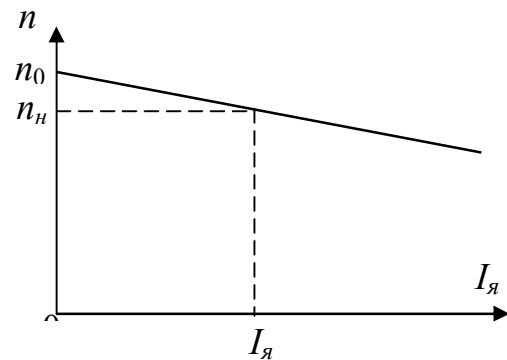


Рис. 81. График скоростной характеристики двигателя

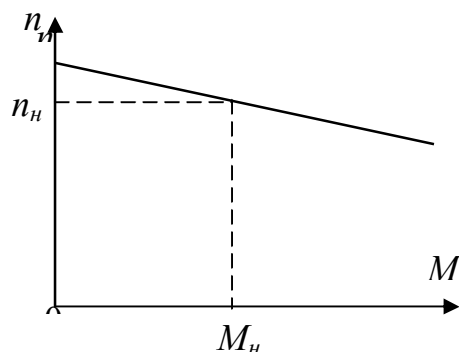


Рис. 82. График механической характеристики двигателя

1) $n=n_0, M=0$; 2) $n=n_n, M=M_n$.

Для расчета номинального момента обычно пользуются уравнением

$$M_n = 9550 \frac{P_{2n}}{n_n}, \quad (204)$$

где P_{2n} – номинальная мощность на валу двигателя в кВт.

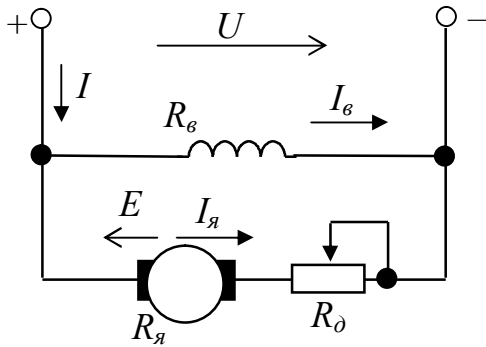


Рис. 83. Электрическая принципиальная схема двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением с добавочным сопротивлением в цепи якоря

В момент пуска двигателя (когда $n=0$) согласно уравнению (189) ($E=C_e\Phi n$) $E=0$, следовательно, в соответствии с уравнением (197)

$$I_{ян} = \frac{U}{R_я}. \quad (205)$$

Ток $I_{ян}$ достигает больших значений, так как сопротивление якоря $R_я$ очень мало (доли Ома)

Для ограничения $I_{ян}$ в цепь якоря на время пуска вводят пусковое сопротивление R_n (рис. 83), которое по мере разгона выводят из цепи якоря.

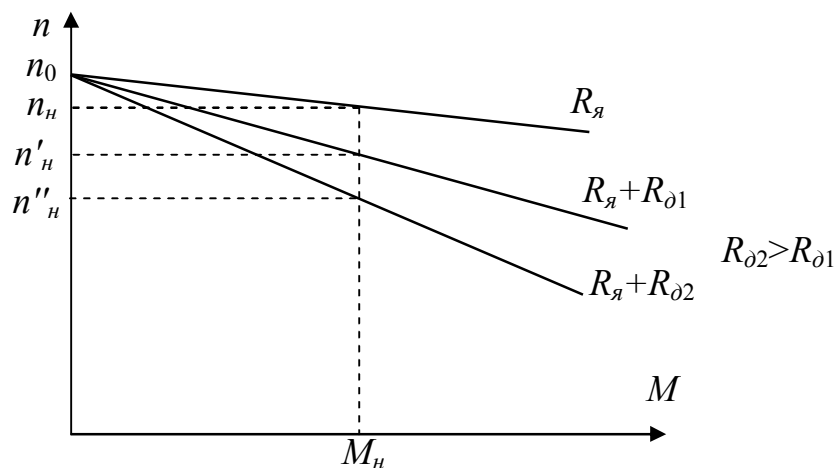


Рис. 84. Графики механических характеристик двигателя при введении в цепь якоря добавочных сопротивлений

При введении в цепь якоря добавочных сопротивлений увеличивается наклон механических характеристик (рис. 84). Такие характеристики называются искусственными или реостатными в отличие от естественной механической характеристики, для которой $R_д=0$. Следует отметить, что добавочное сопротивление обычно состоит из гирлянды последовательно соединенных сопротивлений и поэтому может изменяться только ступенчато.

5.6. Регулирование частоты вращения двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением

Согласно уравнению (199) $n = \frac{U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{C_e \Phi}$ частоту вращения n можно

регулировать:

- изменением магнитного потока Φ (т.е. тока возбуждения $I_{\text{в}}$);
- введением добавочного сопротивления в якорную цепь;
- изменением подводимого напряжения.

Наиболее экономичным является способ регулирования изменением магнитного потока Φ , т.е. тока в обмотке возбуждения $I_{\text{в}}$ (рис. 85). С уменьшением Φ согласно уравнению (200) частота вращения возрастает по отношению к номинальной (рис. 86).

Однако верхний предел регулирования частоты вращения ограничен механической прочностью машины. Поэтому

чтобы не допустить аварийной ситуации. Это обстоятельство является недостатком данного способа регулирования.

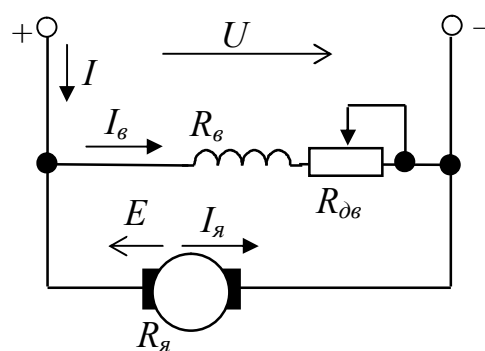


Рис. 85. Электрическая принципиальная схема двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением с добавочным сопротивлением в обмотке возбуждения

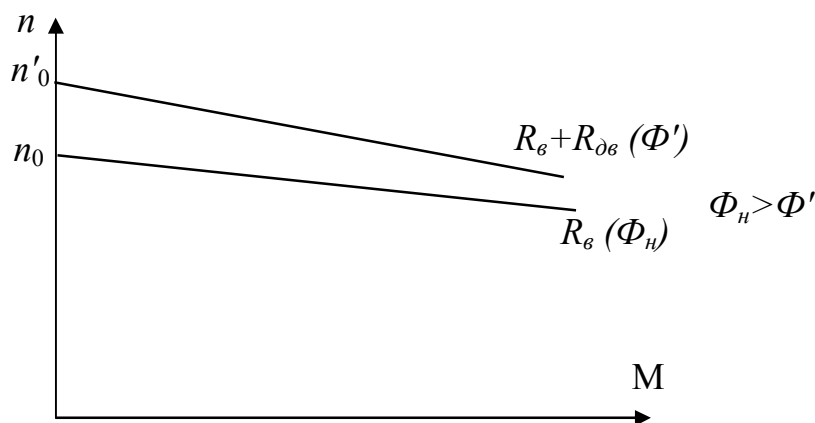


Рис. 86. Графики механических характеристик двигателя при введении в цепь обмотки возбуждения добавочного сопротивления

Другой способ регулирования частоты вращения заключается в том, что добавочное сопротивление $R_{\text{д}}$ включается в цепь якоря двигателя. В этом

случае получается искусственная механическая характеристика, уравнение которой имеет вид

$$n_u = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{0,105 M (R_{\text{я}} + R_{\text{с}})}{(C_e \Phi)^2}. \quad (206)$$

Из графиков механических характеристик, представленных на рис. 84, видно, что при одном и том же номинальном моменте большей величине добавочного сопротивления соответствует меньшая частота вращения ($n''_H < n'_H < n_H$).

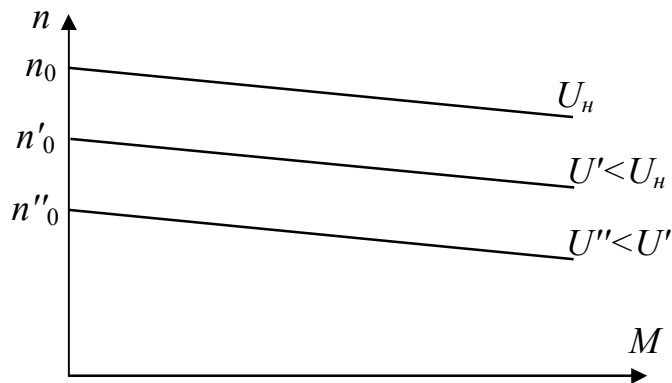


Рис. 87. Графики механических характеристик двигателя при уменьшении подводимого напряжения

Недостатками такого способа регулирования частоты вращения являются:

- 1) большие потери мощности на добавочном сопротивлении;
- 2) регулирование частоты вращения ступенчатое, а не плавное;
- 3) уменьшение жесткости механических

нения частоты вращения двигателя в зависимости от нагрузки на валу;

4) процесс регулирования идет только в сторону уменьшения частоты вращения относительно номинальной.

Регулирование частоты вращения изменением подводимого напряжения U возможно только путем снижения его величины. Из графиков механических характеристик, представленных на рис. 87, видно, что при уменьшении подводимого напряжения механическая характеристика смещается вниз.

5.7. Характеристики двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением

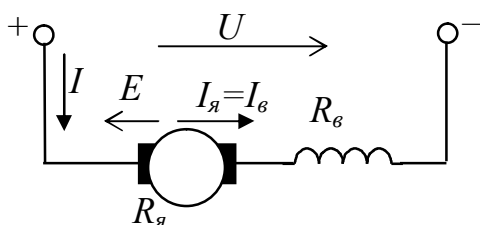


Рис. 88. Электрическая принципиальная схема двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением

Электрическая принципиальная схема двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением изображена на рис. 88.

Обмотка возбуждения такого двигателя выполняется толстым проводом с малым числом витков.

При подаче напряжения к двигателю по цепи якоря и

буждения протекает ток. Так как обмотка якоря соединена последовательно с обмоткой возбуждения, то

$$I = I_{\text{я}} = I_{\text{в}}. \quad (207)$$

В отличие от двигателей с параллельным возбуждением магнитный поток двигателя с последовательным возбуждением зависит от тока якоря.

Зависимость магнитного потока Φ от тока в обмотке возбуждения является нелинейной (рис. 89).

Для двигателя с последовательным возбуждением

$$I_{\text{я}} = I_{\text{в}}. \quad (208)$$

Поэтому магнитный поток Φ является некоторой функцией тока якоря $I_{\text{я}}$. Характер этой функции изменяется в зависимости от нагрузки на валу двигателя.

Двигатели постоянного тока с последовательным возбуждением рассчитаны на работу с номинальной нагрузкой в насыщенной области характеристики намагничивания.

Двигатели, работающие в ненасыщенной области характеристики, имеют повышенные габариты.

Так как обмотка якоря

следовательно с обмоткой возбуждения, то уравнение электрического состояния двигателя будет иметь вид

$$U = E + I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\text{в}}). \quad (209)$$

Из уравнения (192) с учетом (209)

$$n = \frac{U - I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\text{в}})}{C_e \Phi}. \quad (210)$$

Это уравнение является уравнением скоростной характеристики двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением.

На рис. 90 показан график скоростной характеристики $n = f_3(I_{\text{я}})$.

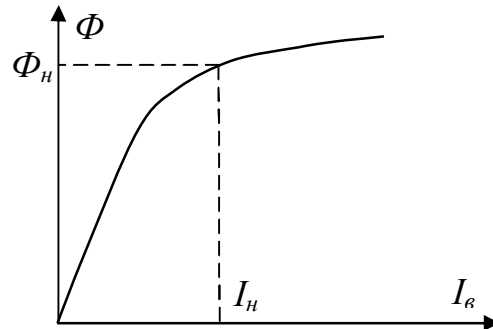


Рис. 89. Зависимость магнитного потока от тока в обмотке возбуждения

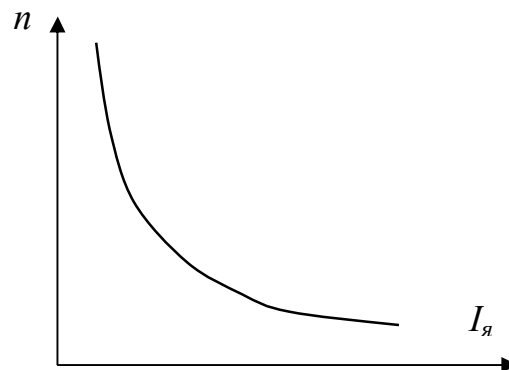


Рис. 90. График скоростной характеристики двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением

В отличие от двигателя с параллельным возбуждением у двигателя с последовательным возбуждением магнитный поток не является величиной постоянной.

Из уравнения (188)

$$I_a = \frac{M}{C_M \Phi}. \quad (211)$$

Произведем подстановку из уравнений (211) и (203) в уравнение (210):

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{0,105 M (R_a + R_e)}{(C_e \Phi)^2}. \quad (212)$$

Уравнение (212) является уравнением механической характеристики двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением. На рис. 91 представлен график этой характеристики.

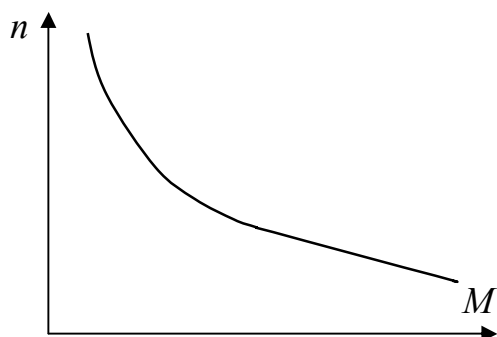


Рис. 91 График механической характеристики двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением

Из графика видно, что механическая характеристика двигателя с последовательным возбуждением является «мягкой». При малых нагрузках частота вращения n резко возрастает (двигатель идет «вразнос»). Поэтому эти двигатели без нагрузки на валу включать нельзя.

Несмотря на этот недостаток, такие двигатели применяются в электроприводах с тяжелыми условиями пуска, работающих при

пределах. В этом случае выбирается режим работы, при котором величина магнитного потока близка к значению насыщения.

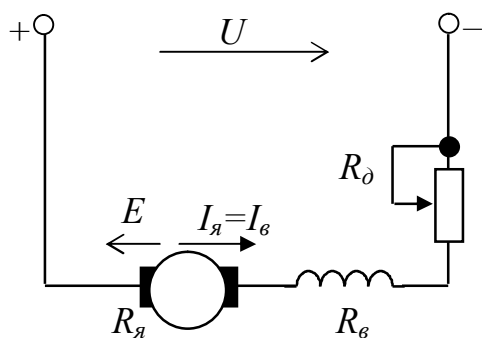


Рис. 92. Электрическая принципиальная схема двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением с добавочным сопротивлением

Пусковой ток

$$I_n = \frac{U}{R_a + R_e}, \quad (213)$$

несмотря на включенную последовательно с обмоткой якоря обмотку возбуждения, достигает весьма больших значений.

Для ограничения I_n в цепь якоря и обмотки возбуждения на время пуска вводят пусковое сопротивление R_n (рис. 92), при этом пусковой ток уменьшается до

ной

$$I_n = \frac{U}{R_{я} + R_{\epsilon} + R_n}. \quad (214)$$

По мере разгона двигателя пусковое сопротивление ступенчато уменьшают. Графики механических характеристик двигателя при введении в цепь якоря и обмотки возбуждения добавочных сопротивлений представлены на рис. 93.

Для построения искусственных механических характеристик двигателя с последовательным возбуждением пользуются универсальными характеристиками $n=f_4(I)$ и $M=f_5(I)$, которые даются заводом-изготовителем на основании опытных данных для серии выпускаемых двигателей. За 100% в графиках данных характеристик взяты номинальные

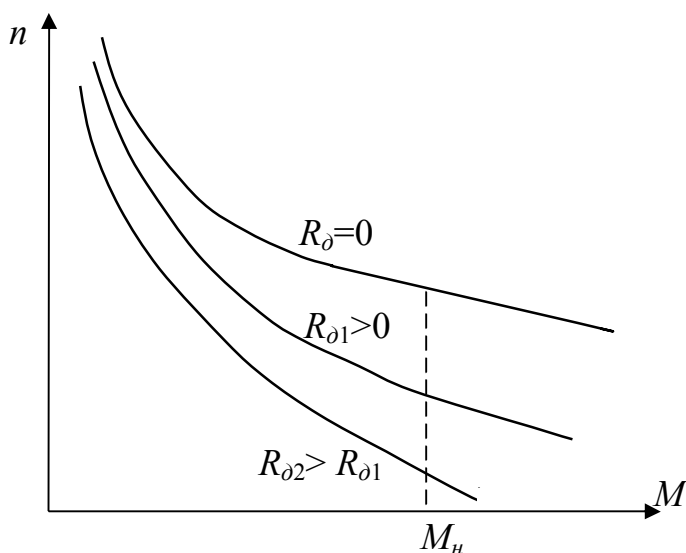


Рис. 93. Графики механических характеристик двигателя при введении в цепь якоря и обмотки возбуждения добавочных сопротивлений

5.8. Регулирование частоты вращения двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением

Как и в двигателях с параллельным возбуждением, в двигателях с последовательным возбуждением применяется три способа регулирования частоты вращения:

- введением добавочного сопротивления в цепь якоря и обмотки возбуждения;
- изменением магнитного потока Φ ;
- изменением подводимого напряжения.

При введении добавочных сопротивлений в цепь якоря и обмотки возбуждения (см. рис. 92) получают искусственные механические характеристики. При одном и том же моменте большему значению добавочного сопротивления соответствует меньшее значение частоты вращения (см. рис. 93).

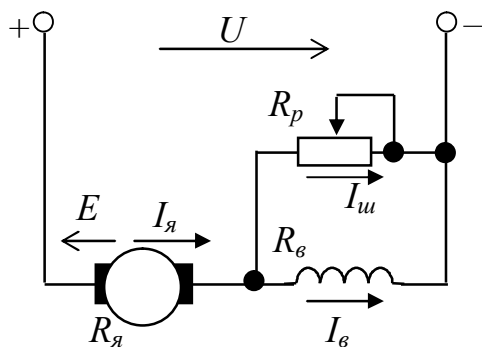


Рис. 94. Регулирование частоты вращения изменением магнитного потока

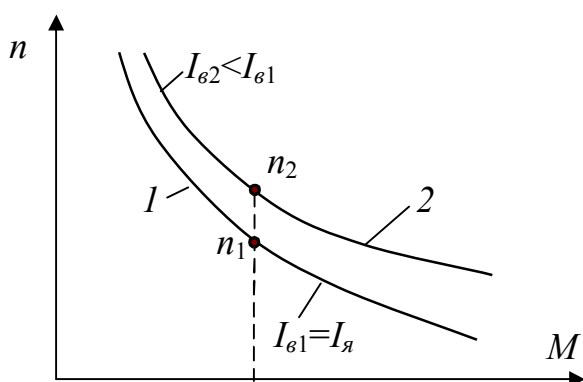


Рис. 95. Механические характеристики при регулировании частоты вращения изменением магнитного потока:

1 – естественная механическая характеристика; 2 – искусственная механическая характеристика при шунтировании обмотки возбуждения

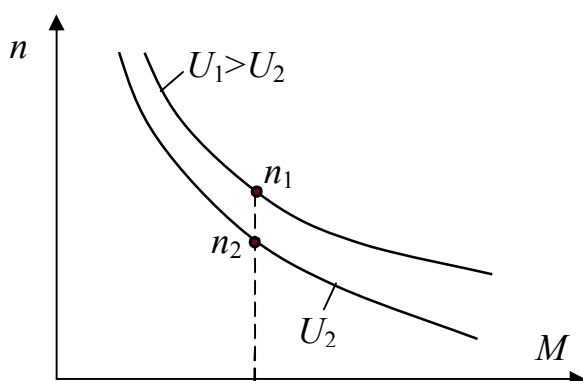


Рис. 96. Механические характеристики при регулировании частоты вращения изменением подводимого к якорю напряжения

Недостатками такого способа регулирования, как и для двигателя с параллельным возбуждением, являются:

1) большие потери мощности в регулировочном сопротивлении;

2) регулирование частоты вращения ступенчатое, а не плавное;

3) уменьшение жесткости механических характеристик.

Более экономичным является регулирование частоты вращения изменением магнитного потока Φ . В этом случае регулировочным реостатом шунтируют обмотку возбуждения (рис. 94), вследствие чего ток обмотки возбуждения уменьшается и, следовательно, уменьшается магнитный поток, а частота вращения увеличивается (рис. 95).

Однако верхний предел регулирования частоты вращения ограничен механической прочностью машины.

Регулирование частоты вращения изменением подводимого напряжения U возможно только путем снижения его величины. При уменьшении подводимого напряжения происходит уменьшение частоты вращения. Механические характеристики в этом

5.9. Характеристики двигателя постоянного тока со смешанным возбуждением

Электрическая принципиальная схема двигателя постоянного тока со смешанным возбуждением представлена на рис. 97.

У двигателей со смешанным возбуждением имеются две обмотки возбуждения, включенные последовательно и параллельно якорю. Основной обмоткой возбуждения считается та, которая создает не менее 70% всей намагничивающей силы.

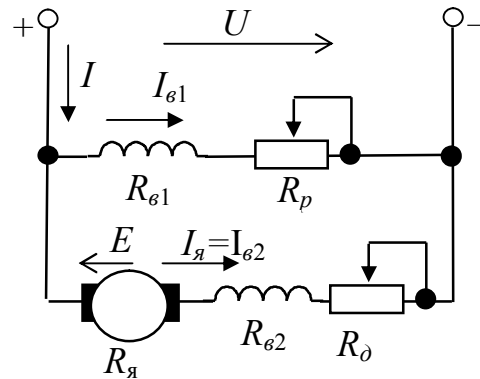


Рис. 97. Электрическая принципиальная схема двигателя постоянного тока со смешанным возбуждением

Последовательную обмотку включают согласно с параллельной обмоткой так, чтобы их намагничивающие силы складывались. В этом случае двигатель приобретает свойства и характеристики, являющиеся средними между свойствами и характеристиками двигателей с параллельным и последовательным возбуждением.

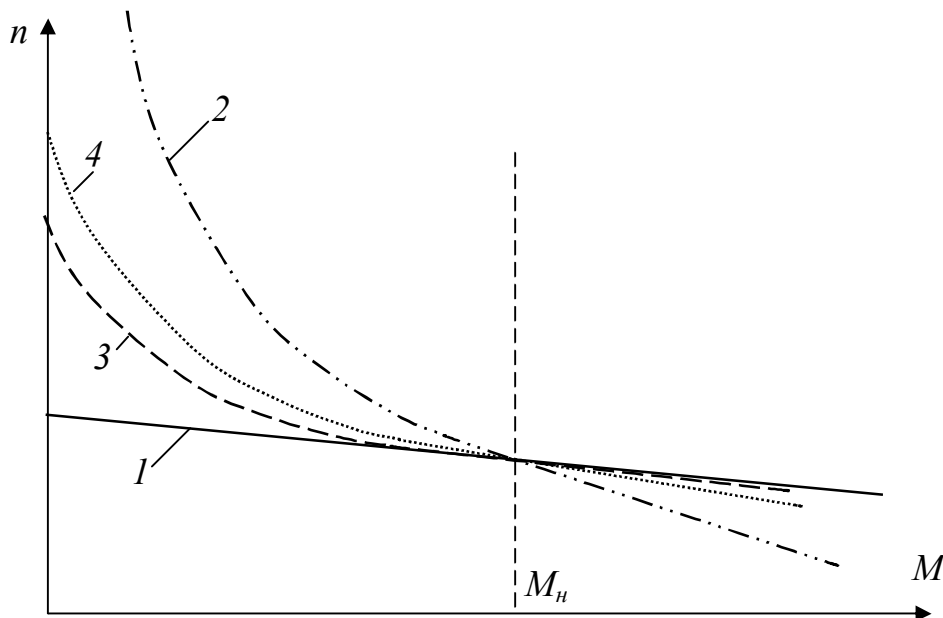


Рис. 98. Механические характеристики двигателя с параллельным (1), последовательным (2) и смешанным (3, 4) возбуждением

В зависимости от соотношения магнитных потоков параллельной и последовательной обмоток механическая характеристика двигателя со

смешанным возбуждением расположена ближе к характеристике 1 или к характеристике 2 (рис. 98).

Одним из достоинств двигателя со смешанным возбуждением является то, что он, обладая «мягкой» механической характеристикой, может работать на холостом ходу, так как частота вращения холостого хода n_0 имеет конечное значение.

5.10. Генераторные и тормозные режимы работы двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением

Одним из режимов работы машины постоянного тока является тормозной, когда электромагнитный момент направлен в сторону, противоположную по отношению к вращению якоря.

Различают три способа торможения двигателя постоянного тока:

- рекуперативное;
- динамическое;
- противовключением.

Рекуперативное торможение является наиболее экономичным по сравнению с остальными.

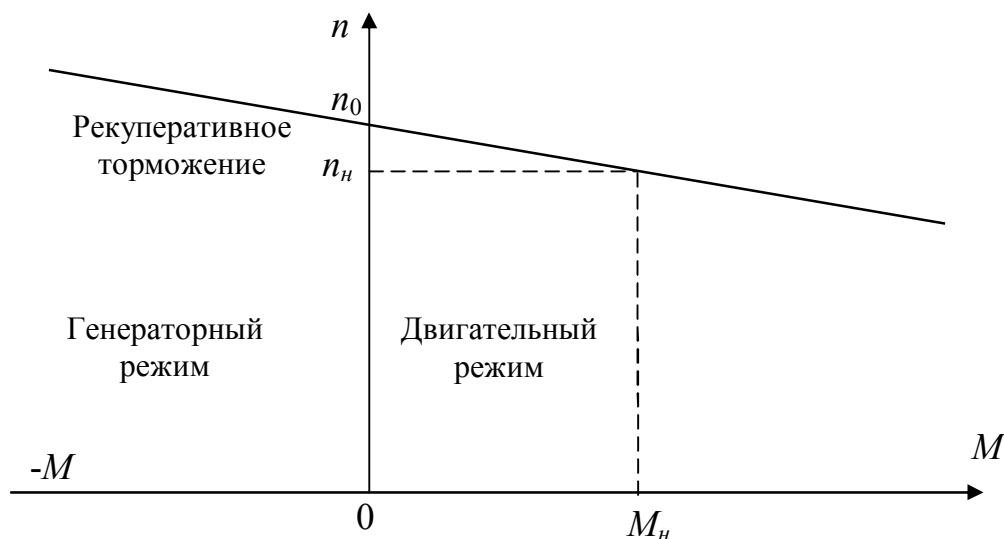


Рис. 99. Механическая характеристика, иллюстрирующая рекуперативное торможение

Данный способ торможения возникает в том случае, когда момент сопротивления приводного механизма совпадает по направлению с электромагнитным вращающим моментом двигателя. В этом случае частота вращения якоря возрастает, достигает частоты холостого хода n_0 и, увеличиваясь далее, обуславливает переход машины из двигательного режима в генераторный (рис. 99). В этом режиме ЭДС, наводимая в якоре,

становится больше напряжения сети U . При этом двигатель не только забирает энергию из сети, но и отдает энергию в сеть (рекуперирует). Показателем смены режима работы машины является изменение направления тока якоря при сохранении направления тока в обмотке возбуждения:

$$\frac{U - E}{R_{\text{я}}} = -I_{\text{я}}. \quad (215)$$

Согласно уравнению (188) $M = C_m \Phi I_{\text{я}}$. Из уравнения видно, что при изменении направления тока якоря изменяется направление вращающего момента. Он становится тормозным.

Примерами работы двигателя в этом режиме являются режимы работы двигателей в грузоподъемных механизмах при спуске легких грузов или режимы работы двигателей на электротранспорте при его движении под уклон (например, трамвай движется под уклон).

Уравнение механической характеристики двигателя, работающего в режиме рекуперативного торможения, имеет вид

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} + \frac{0,105 M R_{\text{я}}}{(C_e \Phi)^2}. \quad (216)$$

Достоинством рекуперативного торможения является возврат электрической энергии от машины обратно в сеть.

Динамическое торможение (рис. 100) возникает после отключения якорной обмотки машины от сети контактами *ЛК* и подключения ее к сопротивлению динамического торможения $R_{\text{от}}$ контактами *КТ*, причем обмотка возбуждения остается подключенной к сети.

Согласно уравнению (191) $I_{\text{я}} = \frac{U - E}{R_{\text{я}}}$.

При отключении якорной обмотки машины от сети и подключении к ней сопротивления $R_{\text{от}}$ $U=0$ и ток якоря в начале торможения оказывается

$$I_{\text{янт}} = \frac{-E_n}{R_{\text{я}} + R_{\text{от}}}, \quad (217)$$

т.е. машина переходит в генераторный режим, при этом ток якоря изменяет направление. Поэтому согласно уравнению (188) изменяет направление и вращающий момент. Он становится тормозным. Величина тормозного момента в начале торможения

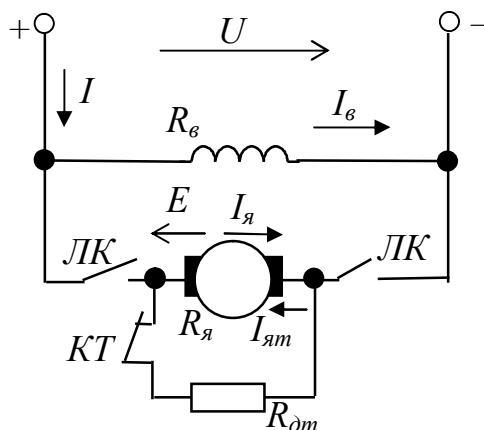


Рис. 100. Схема включения двигателя при динамическом торможении

$$M_{нт} = C_m \Phi I_{янт}, \quad (218)$$

где $I_{янт}$ – ток якоря в момент начала торможения.

Время торможения определяется величиной сопротивления $R_{\partial m}$.

Уравнение механической характеристики двигателя в режиме динамического торможения имеет вид

$$n = \frac{0,105 M (R_{я} + R_{\partial m})}{(C_e \Phi)^2}. \quad (219)$$

Графики механической характеристики двигателя в режиме динамического торможения при различной величине $R_{\partial m}$ представлены на рис. 101.

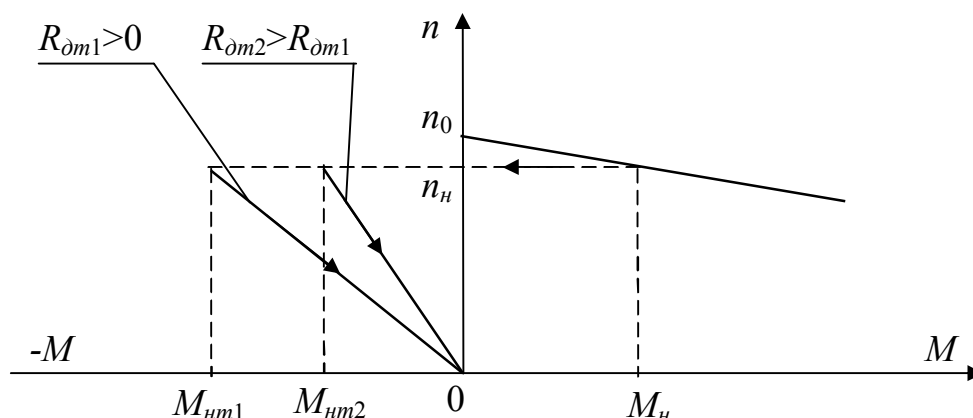


Рис. 101. Графики механической характеристики двигателя в режиме динамического торможения при различной величине $R_{\partial m}$:
 $M_{нт1}$, $M_{нт2}$ – моменты начала торможения

Режим динамического торможения используется для быстрой остановки двигателя, работающего с большой нагрузкой на валу. При завершении динамического торможения двигатель останавливается. Достоинством динамического торможения является простота его осуществления.

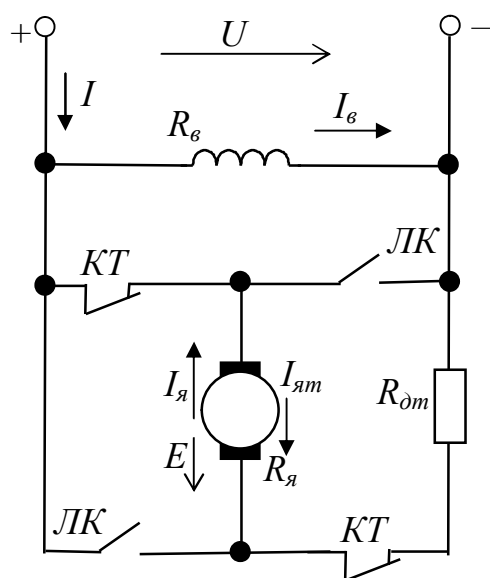


Рис. 102. Схема включения двигателя при торможении противовключением

Торможение *противовключением* возникает после смены полярности напряжения, приложенного к обмотке якоря (рис. 102).

Механическая характеристика двигателя для этого случая приведена на рис. 103. При работе машины в двигательном режиме замкнуты контакты ЛК и разомкнуты контакты КТ (см. рис. 102). Электромагнитный момент является вращающим. При размыкании контактов ЛК и замыкании контактов КТ ток якоря меняет направление, за счет чего электромагнитный момент

После торможения двигатель останавливается ($n=0$ в точке N на рис. 103). Если в этот момент времени двигатель не будет отключен от сети, то электромагнитный момент вновь становится вращающим и двигатель начинает разгоняться в обратном направлении.

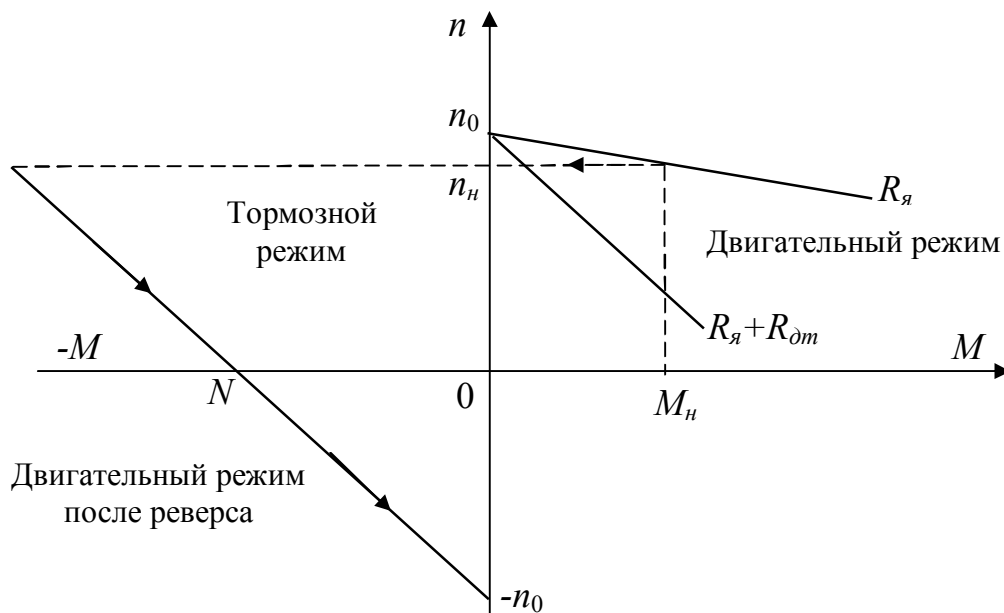


Рис. 103. Механическая характеристика двигателя при торможении противовключением

Режим торможения противовключением (режим электромагнитного тормоза) может возникнуть также при работе двигателя, если к валу двигателя приложить достаточно большой тормозной момент, при котором двигатель начинает вращаться в обратную сторону.

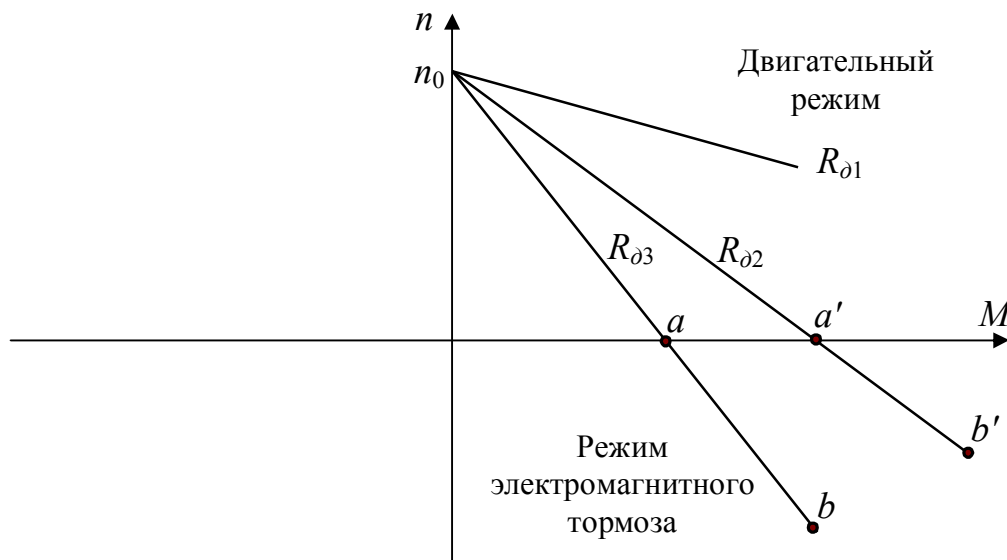


Рис. 104. Механические характеристики двигателя в режиме торможения противовключением

при разных сопротивлениях в цепи якоря: $R_{\partial 3} > R_{\partial 2} > R_{\partial 1}$

Торможение противовключением возникает и при работе двигателя, например, в грузоподъемных механизмах при спуске тяжелых грузов. В этом случае двигатель включается на подъем, электромагнитный момент становится тормозным (рис. 104), и вращение осуществляется за счет сторонних сил (под действием силы тяжести груза).

При этом ЭДС, наводимая в якоре, меняет свое направление по отношению к двигательному режиму, а ток якоря равен

$$I_{\text{я}} = \frac{U + E}{R_{\text{я}} + R_{\text{от}}}, \quad (220)$$

где $R_{\text{от}}$ – дополнительное сопротивление, которое необходимо включить в цепь якоря, чтобы ограничить ток.

5.11. Коэффициент полезного действия двигателя и потери мощности

Коэффициент полезного действия (КПД) двигателя определяется по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%, \quad (221)$$

где P_1 – мощность, подводимая к двигателю из сети; P_2 – полезная мощность на валу двигателя.

$$P_1 = P_2 + \sum \Delta P, \quad (222)$$

где $\sum \Delta P$ – суммарные потери мощности.

Потери мощности можно разделить на постоянные и переменные.

Постоянные потери мощности – это такие потери, величина которых не зависит от нагрузки на валу двигателя. К постоянным потерям относятся:

- механические потери;
- потери в стали;
- добавочные потери.

К *механическим потерям* $\Delta P_{\text{мех}}$ относятся потери, обусловленные трением в подшипниках, трением щеток по коллектору; трением якоря в воздухе и вентиляционным действием при вращении якоря и вентилятора двигателя, если он имеется.

$$\Delta P_{\text{мех}} = (2 - 4)\% P_1. \quad (223)$$

Потери в стали (электромагнитные потери) $\Delta P_{\text{ст}}$ обусловлены перемагничиванием материала сердечника (железа) якоря и вихревыми токами. Потери при перемагничивании материала сердечника пропорциональны площади петли гистерезиса, частоте перемагничивания

(частоте вращения якоря) и максимальной величине индукции. Потери на вихревые токи пропорциональны частоте перемагничивания и квадрату магнитной индукции.

$$\Delta P_{cm} = (1 - 2)\% P_1. \quad (224)$$

К добавочным потерям $\Delta P_{доб}$ относятся потери в полюсных наконечниках, обусловленные пульсациями магнитного поля из-за наличия зубцов якоря, и другие трудноопределимые потери.

$$\Delta P_{доб} \approx 1\% P_1. \quad (225)$$

Переменные потери мощности – это потери, величина которых зависит от тока в обмотках якоря и возбуждения. К таким потерям относятся электрические потери ΔP_{ϵ} .

$$\Delta P_{\epsilon} = \Delta P_{\epsilon я} + \Delta P_{\epsilon \epsilon}, \quad (226)$$

где $\Delta P_{\epsilon я}$ – потери мощности в обмотке якоря; $\Delta P_{\epsilon \epsilon}$ – потери мощности в обмотке возбуждения.

$$\Delta P_{\epsilon я} = I_{\epsilon я}^2 R_{\epsilon я}; \quad (227)$$

$$\Delta P_{\epsilon \epsilon} = I_{\epsilon \epsilon}^2 R_{\epsilon \epsilon} = I_{\epsilon \epsilon} U_{\epsilon \epsilon}. \quad (228)$$

Обычно

$$\Delta P_{\epsilon я} = (7 - 8)\% P_1; \quad \Delta P_{\epsilon \epsilon} = (1 - 1,5)\% P_1. \quad (229)$$

Таким образом, суммарные потери мощности

$$\sum \Delta P = \Delta P_{мех} + \Delta P_{cm} + \Delta P_{доб} + \Delta P_{\epsilon я} + \Delta P_{\epsilon \epsilon}. \quad (230)$$

5.12. Примеры расчета режимов работы двигателей

постоянного тока и построения механической характеристики

Пример 1

Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением (рис. 105), подключенный к сети с напряжением $U_H = 220$ В, потребляет при номинальной нагрузке ток $I_H = 20,5$ А. В режиме холостого хода ток потребления составляет $I_0 = 2,35$ А. Сопротивление обмотки якоря $R_{\epsilon я} = 0,75$ Ом; сопротивление обмотки возбуждения $R_{\epsilon \epsilon} = 258$ Ом. Номинальная частота вращения $n_n = 1025$ об/мин

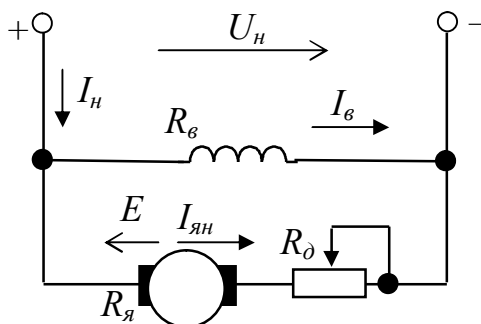


Рис. 105. Схема подключения двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением к примеру расчета режима его работы

Определить номинальную мощность на валу двигателя, номинальный КПД, номинальный вращающий момент, пусковой ток при пуске двигателя без пускового реостата, сопротивление пускового реостата для условия $I_n = 2,5 \cdot I_n$ и пусковой момент при пуске двигателя с реостатом. Построить механические характеристики двигателя. При решении считать магнитные и механические потери не зависящими от нагрузки.

Решение.

1. Номинальная мощность на валу двигателя $P_{2н} = P_{1н} - \sum \Delta P$,
где $\sum \Delta P$ – потери мощности в двигателе; $P_{1н}$ – потребляемая мощность.

$$P_{1н} = U_n \cdot I_n = 220 \cdot 20,5 = 4510 \text{ Вт} = 4,51 \text{ кВт.}$$

Для определения потерь в цепи якоря и в цепи возбуждения определим ток в цепи якоря $I_{ян}$ и ток возбуждения I_{ϵ} .

$$I_{\epsilon} = \frac{U_n}{R_{\epsilon}} = \frac{220}{258} = 0,85 \text{ А};$$

$$I_{ян} = I_n - I_{\epsilon} = 20,5 - 0,85 = 19,65 \text{ А.}$$

2. Потери в обмотке якоря и в цепи возбуждения

$$\Delta P_{ян} = R_{я} \cdot I_{ян}^2 = 0,75 \cdot 19,65^2 = 290 \text{ Вт};$$

$$\Delta P_{\epsilon} = R_{\epsilon} \cdot I_{\epsilon}^2 = 258 \cdot 0,85^2 = 186 \text{ Вт.}$$

3. Магнитные и механические потери $\Delta P_m + \Delta P_{мех} = P_0 - \Delta P_{я0} - \Delta P_{\epsilon}$,
где P_0 – потребляемая двигателем мощность в режиме холостого хода;
 $\Delta P_{я0}$ – потери в обмотке якоря в режиме холостого хода.

$$P_0 = U_n \cdot I_0 = 220 \cdot 2,35 = 517 \text{ Вт};$$

$$\Delta P_{я0} = R_{я} (I_0 - I_{\epsilon})^2 = 0,75 (2,35 - 0,85)^2 = 1,7 \text{ Вт};$$

$$\Delta P_{мех} + \Delta P_m = P_0 - \Delta P_{я0} - \Delta P_{\epsilon} = 517 - 1,7 - 186 = 329,3 \text{ Вт};$$

$$\sum \Delta P = 290 + 186 + 329,3 = 805,3 \text{ Вт};$$

$$P_{2н} = P_{1н} - \sum \Delta P = 4510 - 805,3 = 3704,7 \text{ Вт} = 3,71 \text{ кВт.}$$

4. Номинальный КПД $\eta_n = \frac{P_{2н}}{P_{1н}} \cdot 100\% = \frac{3,71}{4,50} \cdot 100\% = 82,2\%$.

5. Номинальный вращающий момент

$$M_n = 9550 \frac{P_{2н}}{n_n} = 9550 \frac{3,71}{1025} = 34,6 \text{ Н·м.}$$

6. Пусковой ток якоря двигателя при пуске без реостата

$$I_{ян} = \frac{U_n}{R_{я}} = \frac{220}{0,75} = 293 \text{ А.}$$

7. Сопротивление пускового реостата определим из уравнения

$$I_{яп} = 2,5 \cdot I_{ян} = \frac{U_n}{R_{я} + R_p},$$

$$\text{откуда } R_p = \frac{U_n}{2,5 \cdot I_{ян}} - R_{я} = \frac{220}{2,5 \cdot 19,65} - 0,75 = 3,73 \text{ Ом.}$$

8. Определим пусковой момент двигателя при пуске с реостатом.

Известно, что вращающий момент двигателя $M = C_m \Phi I_{я}$.

Для режима номинальной нагрузки $M_n = C_m \Phi I_{ян}$;

для режима пуска $M_n = C_m \Phi I_{яп}$.

Считая магнитный поток постоянным, имеем $\frac{M_n}{M_n} = \frac{I_{яп}}{I_{ян}}$,

$$\text{откуда } M_n = M_n \frac{I_{яп}}{I_{ян}} = 34,6 \frac{2,5 \cdot 19,65}{19,65} = 86,5 \text{ Н·м.}$$

9. Естественная механическая характеристика (рис. 106) согласно уравнению механической характеристики $n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{0,105 M R_{я}}{(C_e \Phi)^2}$

представляет собой прямую линию, которая строится по двум точкам с координатами: 1) $M=0$, n_0 ; 2) M_n , n_n .

Координаты первой точки относятся к режиму идеального холостого хода. Частота вращения идеального холостого хода

$$n_0 = \frac{U_n}{C_e \Phi} = \frac{U_n n_n}{E_n} = \frac{220 \cdot 1025}{205} = 1100 \frac{\text{об}}{\text{мин}},$$

где $E_n = U_n - I_{ян} \cdot R_{я} = 220 - 19,65 \cdot 0,75 = 205 \text{ В}$.

Координаты второй точки относятся к номинальному режиму

$$M_n = 34,6 \text{ Н·м; } n_n = 1025 \frac{\text{об}}{\text{мин}}.$$

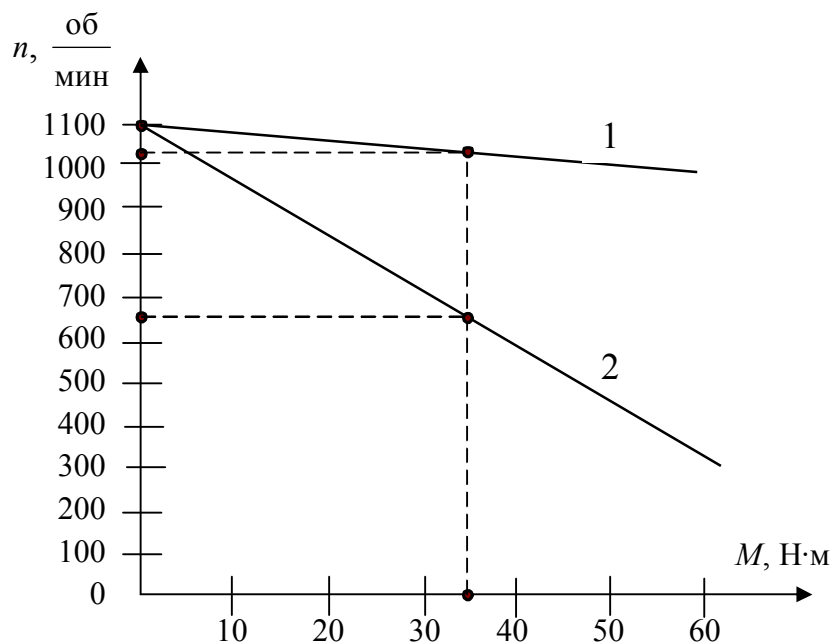


Рис. 106. Механические характеристики двигателя:

1 – естественная; 2 – искусственная

Искусственная механическая характеристика (см. рис. 106), как и естественная, строится по двум точкам с координатами: 1) $M=0, n_0$; 2) M_n, n_n .

Для построения искусственной механической характеристики необходимо рассчитать частоту вращения якоря при введенном в цепь якоря дополнительном сопротивлении и номинальном моменте на валу. Этот расчет можно произвести по уравнению скоростной характеристики

$$n_n = \frac{U_n - I_{ян}(R_{я} + R_d)}{C_e \Phi},$$

где

$$C_e \Phi = \frac{U_n - I_{ян} R_{я}}{n_n} = \frac{220 - 19,65 \cdot 0,75}{1025} = 0,2 \frac{\text{В} \cdot \text{мин}}{\text{об}};$$

$$n_n = \frac{220 - 19,65(0,75 + 3,73)}{0,2} = 660 \frac{\text{об}}{\text{мин}}.$$

Пример 2

Двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением работает от сети напряжением $U_n=220$ В. Номинальный вращающий момент $M_n=75$ Н·м, номинальная частота вращения $n_n=1020 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$; сопротивление обмотки якоря $R_{я}=0,4$ Ом; сопротивление обмотки возбуждения $R_g=0,3$ Ом; номинальный КПД $\eta_n=81,5\%$.

Определить: 1) номинальную мощность на валу двигателя и мощность, потребляемую из сети при номинальной нагрузке; 2) номинальный ток двигателя; 3) противо-ЭДС и электромагнитную мощность (мощность, передаваемую на якорь); 4) потери в двигателе при номинальной нагрузке и сопротивление пускового реостата, при котором пусковой ток превышает номинальный в 2 раза.

Решение.

1. Номинальная мощность на валу двигателя

$$P_{2n} = \frac{M_n \cdot n_n}{9550} = \frac{75 \cdot 1020}{9550} = 8 \text{ кВт}.$$

2. Потребляемая мощность

$$P_{1н} = \frac{P_{2н}}{\eta_n} = \frac{8}{0,815} = 9,8 \text{ кВт.}$$

3. Номинальный ток двигателя

$$I_n = \frac{P_{1н}}{U_n} = \frac{9,8 \cdot 1000}{220} = 44,5 \text{ А.}$$

Найденный ток является током обмоток якоря и возбуждения

$$I_{я н} = I_g = 44,5 \text{ А.}$$

4. Против-ЭДС, наводимая в обмотке якоря,

$$E = U_n - (R_{я} + R_g) \cdot I_n = 220 - (0,4 + 0,3) \cdot 44,5 = 188,8 \text{ В.}$$

5. Электромагнитная мощность

$$P_{эм} = E \cdot I_n = 188,8 \cdot 44,5 = 8400 \text{ Вт} = 8,4 \text{ кВт.}$$

6. Магнитные и механические потери

$$\Delta P_m + \Delta P_{мех} = P_{эм} - P_{2н} = 8,4 - 8 = 0,4 \text{ кВт.}$$

7. Потери в обмотках якоря и возбуждения:

$$\Delta P_{я н} = R_{я} \cdot I_{я н}^2 = 0,4 \cdot 44,5^2 = 792 \text{ Вт};$$

$$\Delta P_g = R_g \cdot I_g^2 = 0,3 \cdot 44,5^2 = 595 \text{ Вт.}$$

8. Суммарные потери мощности в двигателе

$$\sum \Delta P_n = P_{1н} - P_{2н} = 9,8 - 8 = 1,8 \text{ кВт.}$$

9. Сопротивление пускового реостата

$$R_p = \frac{U_n}{2I_{я н}} - (R_{я} + R_g) = \frac{220}{2 \cdot 44,5} - (0,4 + 0,3) = 1,77 \text{ Ом.}$$

Контрольные вопросы по машинам постоянного тока

1. В чем преимущество двигателей постоянного тока перед асинхронными двигателями?

1) возможность плавного регулирования частоты вращения и наличие большого пускового момента;

2) наличие малого пускового момента;

3) более простые в эксплуатации.

2. Найти ЭДС, наводимую в обмотке якоря двигателя постоянного тока, если частота вращения двигателя $n = 1000 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$, магнитный поток $\Phi = 2,0 \cdot 10^{-2} \text{ Вб}$, а постоянная машины $C_e = 10$.

1) 100 В; 2) 20 В; 3) 200 В; 4) 10 В.

3. Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением имеет следующие паспортные данные: напряжение $U_n = 220 \text{ В}$; номинальный ток

$I_n=10$ А; ток возбуждения $I_\epsilon=2$ А; сопротивление якоря $R_\epsilon=1,0$ Ом. Чему равна ЭДС якоря E ?

- 1) 212 В; 2) 100 В; 3) 424 В; 4) 112 В.

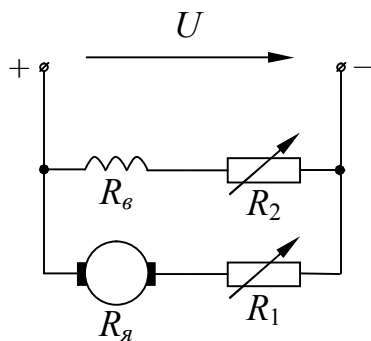
4. Ток якоря двигателя постоянного тока увеличился в 2 раза. Как изменился вращающий момент двигателя с параллельным возбуждением?

- 1) не изменился; 2) увеличился в 2 раза; 3) уменьшился в 2 раза.

5. При постоянном напряжении магнитный поток обмотки возбуждения двигателя постоянного тока уменьшился. Как изменилась частота вращения двигателя?

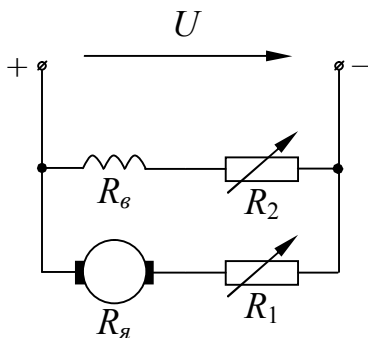
- 1) увеличилась; 2) не изменилась; 3) уменьшилась.

6. Как изменится частота вращения двигателя постоянного тока с увеличением сопротивления R_2 ?



- 1) увеличится;
2) уменьшится;
3) останется неизменной.

7. Как изменится частота вращения двигателя постоянного тока при уменьшении сопротивления R_1 ?

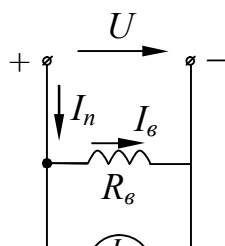


- 1) увеличится;
2) уменьшится;
3) останется неизменной.

8. Почему в момент пуска двигателя постоянного тока пусковой ток двигателя в несколько раз превышает номинальный ток?

- 1) ЭДС, наводимая в якоре в момент пуска, равна 0;
2) сопротивление якоря при пуске меньше, чем в номинальном режиме.

9. Определить пусковой ток двигателя параллельного возбуждения, если двигатель работает при $U=110$ В; $R_\epsilon=2,5$ Ом; $I_\epsilon=1$ А.



- 1) 50 А;
- 2) 45 А;
- 3) 10 А;
- 4) 25 А.

10. Ток в обмотке якоря двигателя постоянного тока изменился от тока холостого хода до номинального значения. В каком случае ЭДС, наводимая в обмотке якоря машины, имела максимальное значение?

- 1) в режиме холостого хода;
- 2) в номинальном режиме;
- 3) ЭДС не зависит от режима работы.

11. Частота вращения двигателя постоянного тока уменьшилась с $3000 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ до $1500 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$. Как изменилась ЭДС обмоток якоря, если магнитный поток остался неизменным?

- 1) уменьшилась в 2 раза;
- 2) увеличилась в 2 раза;
- 3) осталась неизменной.

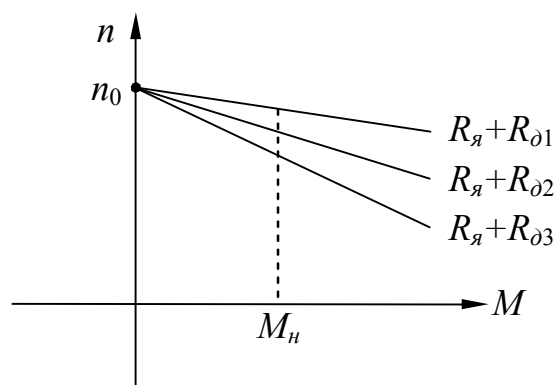
12. Какое из приведенных уравнений соответствует уравнению механической характеристики двигателя постоянного тока?

1) $M = C_m \cdot \Phi \cdot I_a$; 2) $n = \frac{U - I_a \cdot R_a}{C_e \cdot \Phi}$; 3) $n = \frac{U}{C_e \cdot \Phi} - \frac{0,105 \cdot M \cdot R_a}{(C_e \cdot \Phi)^2}$.

13. Частота вращения двигателя постоянного тока n уменьшилась. Как изменилась при этом ЭДС, наводимая в обмотке якоря двигателя?

- 1) не изменилась;
- 2) увеличилась;
- 3) уменьшилась;
- 4) в двигателе ЭДС не индуцируется.

14. В каких соотношениях находятся величины добавочных сопротивлений, вводимых в цепь якоря двигателя, на приведенных графиках механических характеристик?

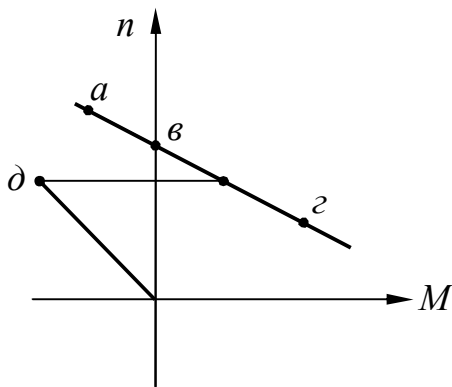


$$1) R_{\partial 1} > R_{\partial 2} > R_{\partial 3};$$

$$2) R_{\partial 1} = R_{\partial 2} = R_{\partial 3};$$

$$3) R_{\partial 1} < R_{\partial 2} < R_{\partial 3}.$$

15. Какому режиму работы двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением соответствует участок $вг$ на механической характеристике двигателя?

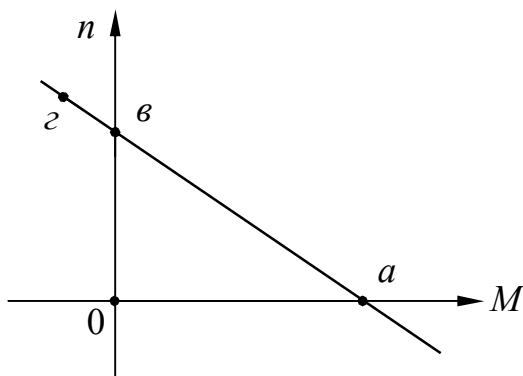


- 1) двигательному режиму;
- 2) генераторному режиму с рекуперацией энергии в сеть;
- 3) режиму динамического торможения.

16. В каком режиме будет работать двигатель с параллельным возбуждением, если частота вращения якоря (под действием внешних причин) окажется выше частоты вращения идеального холостого хода?

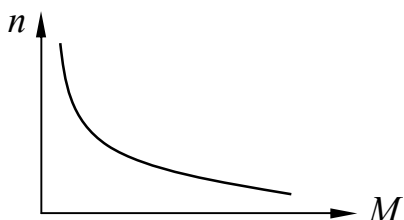
- 1) генераторный режим с рекуперацией энергии в сеть;
- 2) режим динамического торможения;
- 3) режим торможения противовключением.

17. Какому режиму работы соответствует участок $вг$ механической характеристики двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением?



- 1) двигательному режиму;
- 2) генераторному режиму с рекуперацией энергии в сеть;
- 3) режиму динамического торможения.

18. Для какого типа двигателя приведен график механической характеристики?



- 1) асинхронного двигателя;
- 2) двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением;
- 3) двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением.

19. Что произойдет, если двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением подключить к сети при отключенной механической нагрузке на валу?

- 1) двигатель не запустится;
- 2) обмотка якоря перегреется;
- 3) двигатель пойдет «вразнос».

20. Чему равна сумма потерь мощности электрического двигателя, если номинальная мощность двигателя $P_{2н}=15$ кВт при $\eta_n=0,8$?

- 1) 3,75 кВт; 2) 5 кВт; 3) 2 кВт; 4) 1,5 кВт.

21. Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением имеет следующие паспортные данные: мощность на валу $P_{2н}=6,0$ кВт; $U_n=220$ В; $I_n=32$ А; $n_n=1000 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$.

Определить коэффициент полезного действия η_n и номинальный вращающий момент M_n .

- 1) $\eta_n=0,65$; $M_n=63,7$ Н·м;
- 2) $\eta_n=0,85$; $M_n=114,7$ Н·м;
- 3) $\eta_n=0,85$; $M_n=57,3$ Н·м;
- 4) $\eta_n=0,95$; $M_n=120,3$ Н·м.

Задание на самостоятельную работу по машинам постоянного тока

Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением, номинальное напряжение которого U_n , развивает номинальную мощность $P_{2н}$. Номинальная частота вращения якоря n_n и номинальный КПД η_n .

Потери мощности в цепи якоря ΔP_n и в цепи возбуждения ΔP_e заданы в процентах от потребляемой мощности P_{1n} .

Определить: ток в цепи возбуждения, ток якоря при номинальной нагрузке, пусковой вращающий момент при пуске двигателя с реостатом, скорость вращения якоря при номинальном моменте на валу двигателя и включенном в цепь якоря добавочного сопротивления, равного $3R_{\text{я}}$. Построить естественную и реостатную механические характеристики двигателя. Данные для расчета приведены в табл. 5.

Таблица 5

Вариант	Данные для расчета					
	U_n , В	P_{2n} , кВт	$\Delta P_{\text{я}}$, %	ΔP_e , %	n , $\frac{\text{об.}}{\text{мин}}$	η_n , %
1	110	60	5,2	4,8	980	86,5
2	220	10	5	4,8	2250	86,0
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	85,0
7	220	10	5,3	4,4	2250	83,0
8	110	77	5	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	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	4,0	1000	84,5
15	220	10	5,2	4,2	970	85,5
16	220	5,8	6,0	5,0	2200	84,0
17	220	19	4,8	4,5	980	86,5
18	220	29	5	4,3	2520	86,0
19	220	46,5	5,4	4,8	1025	82,2
20	220	14	4	4,6	2400	84,0
21	220	20	5,1	4,2	2100	85,5
22	220	33,5	5,5	4	1000	84,5
23	220	8,5	4	4,1	2250	85,5
24	220	13,5	4,8	4,2	1050	85,5
25	110	60	5,0	4	1150	84,5

6. ТРАНСФОРМАТОРЫ

Трансформатором называется статический электромагнитный аппарат, служащий для преобразования электрической энергии переменного тока с одними параметрами в электрическую энергию с другими параметрами.

Трансформаторы позволяют передавать мощность от источника к приемнику при разных напряжениях и токах. Без учета потерь мощности

$$S = U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 = \text{const}, \quad (231)$$

где U_1, I_1 – соответственно напряжение и ток первичной обмотки; U_2, I_2 – соответственно напряжение и ток вторичной обмотки.

Трансформаторы используются для преобразования электрической энергии при передаче ее на расстояния. На электростанции электрическая энергия вырабатывается посредством синхронных генераторов напряжением от 6 до 35 кВ. При передаче такого напряжения на большие расстояния будут большие потери мощности в ЛЭП. Эти потери пропорциональны квадрату тока. Для уменьшения потерь уменьшают силу тока за счет увеличения напряжения. Поэтому на выходе электрической станции устанавливают трансформаторные подстанции, на которых напряжение повышается до величины 750–1150 кВ. Перед населенными пунктами устанавливают понижающие трансформаторные подстанции.

Трансформаторы используются также во вторичных источниках электропитания, в различных электронных схемах.

6.1. Принцип действия трансформатора

Трансформатор выполнен на базе замкнутого магнитопровода, собранного из листов электротехнической стали.

На магнитопроводе имеются обмотки. Трансформатор обычно имеет одну первичную и одну или несколько вторичных обмоток. Рассмотрим трансформатор с одной вторичной обмоткой (рис. 107).

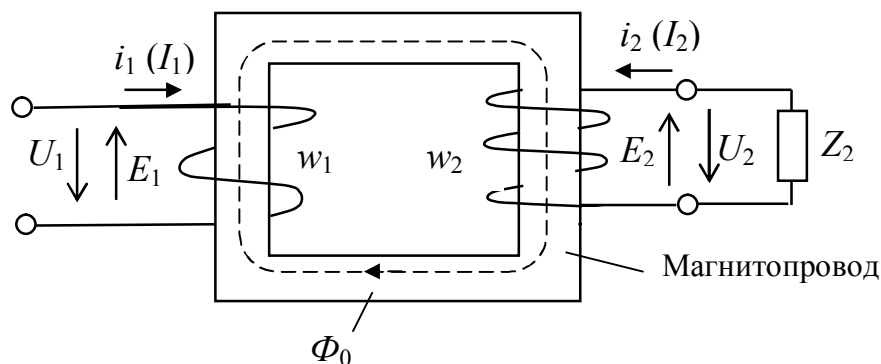


Рис. 107. Трансформатор с одной вторичной обмоткой
(w_1, w_2 – число витков первичной и вторичной обмоток соответственно)

Под действием напряжения, приложенного к первичной обмотке, в ней протекает ток I_1 , создающий основной магнитный поток Φ_0 , замыкающийся по магнитопроводу. Кроме основного, возникает еще магнитный поток рассеяния Φ_{S1} , замыкающийся по воздуху.

Произведение $I_1 w_1$ является намагничивающей силой первичной обмотки, определяющей величину магнитного потока Φ_1 .

Таким образом,

$$\overline{\Phi}_1 = \overline{\Phi}_0 + \overline{\Phi}_{S1}. \quad (232)$$

Магнитный поток рассеяния ввиду большого сопротивления воздуха очень мал, и им можно пренебречь. В режиме холостого хода магнитный поток рассеяния составляет всего 0,25% от основного потока, поэтому им можно пренебречь и считать, что

$$\Phi_1 = \Phi_0. \quad (233)$$

Основной магнитный поток Φ_0 наводит ЭДС самоиндукции в первичной обмотке E_1 и ЭДС взаимной индукции E_2 во вторичной обмотке:

$$E_1 = 4,44 f_1 w_1 \Phi_0; \quad (234)$$

$$E_2 = 4,44 f_1 w_2 \Phi_0. \quad (235)$$

Напряжение, подводимое к первичной обмотке, уравнивается ЭДС E_1 и падением напряжения в этой обмотке.

$$\overline{U}_1 = \overline{E}_1 + \overline{I}_1 Z_1, \quad (236)$$

где Z_1 – полное сопротивление первичной обмотки.

Коэффициент трансформации

$$K_{TP} = \frac{E_2}{E_1} = \frac{w_2}{w_1}. \quad (237)$$

Трансформатор может работать либо в режиме холостого хода, когда вторичная обмотка разомкнута, либо в нагруженном режиме, когда ко вторичной обмотке подключена нагрузка.

6.2. Работа трансформатора в режиме холостого хода

Электрическая схема трансформатора в режиме холостого хода представлена на рис. 108.

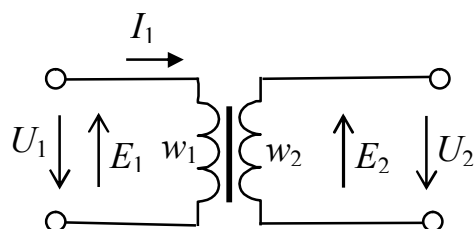


Рис. 108. Электрическая схема трансформатора в режиме холостого хода

В этом режиме

$$\Phi_0 = \Phi_1. \quad (238)$$

Напряжение на вторичной обмотке равно наводимой в этой обмотке ЭДС

$$U_2 = E_2, \quad (239)$$

так как без нагрузки падение напряжения во вторичной обмотке равно нулю.

В режиме холостого хода ток первичной обмотки мал и составляет 3–6% от номинального значения. Причем

ший процент относится к более мощным трансформаторам. Поэтому потери напряжения $I_1 Z_1$ в самой обмотке трансформатора малы, и можно считать, что

$$U_1 \approx E_1, \quad (240)$$

следовательно, в режиме холостого хода коэффициент трансформации можно определить как

$$K_{TP} \approx \frac{U_2}{U_1}. \quad (241)$$

6.3. Работа трансформатора с нагрузкой

Электрическая схема трансформатора с нагрузкой представлена на рис. 109. Так как вторичная обмотка замкнута на нагрузку, то под действием

ЭДС вторичной обмотки протекает ток вторичной обмотки I_2 , за счет которого возникает намагничивающая сила вторичной обмотки $I_2 w_2$, создающая магнитный поток вторичной обмотки Φ_2 .

Суммарный магнитный поток (без учета магнитных

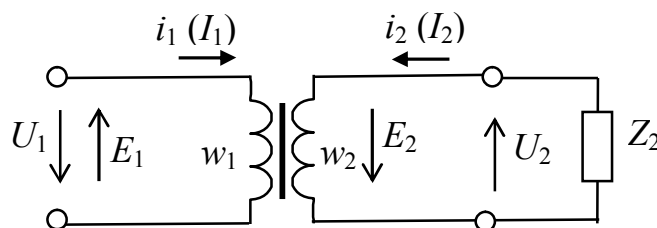


Рис. 109. Электрическая схема трансформатора с нагрузкой

ков рассеяния первичной и вторичной обмоток), замыкаемый по магнитопроводу,

$$\overline{\Phi}_0 = \overline{\Phi}_1 + \overline{\Phi}_2. \quad (242)$$

Увеличение тока нагрузки I_2 ведет к увеличению магнитного потока вторичной обмотки. Этот поток по закону Ленца направлен противоположно магнитному потоку первичной обмотки, что приводит к уменьшению ЭДС E_1 , но т.к. величина приложенного к первичной обмотке напряжения $\overline{U}_1 = \overline{E}_1 + \overline{I}_1 \overline{Z}_1 = \text{const}$, то произойдет увеличение тока I_1 на столько, на сколько его стремится уменьшить ток I_2 .

Таким образом, магнитный поток, замыкаемый на магнитопроводе, остается величиной неизменной, не зависящей от нагрузки во вторичной обмотке. Вторичная обмотка трансформатора работает в режиме генератора

$$\overline{U}_2 = \overline{E}_2 - \overline{I}_2 \overline{Z}_2, \quad (243)$$

где Z_2 — полное сопротивление вторичной обмотки трансформатора.

Зависимость напряжения вторичной

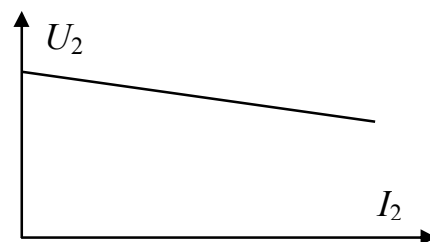


Рис. 110. Нагрузочная характеристика трансформатора

зочной характеристикой трансформатора (рис. 110).

С увеличением тока нагрузки I_2 уменьшается напряжение U_2 (см. рис. 110).

6.4. Трехфазные трансформаторы

Трансформация трехфазного тока может осуществляться двумя способами:

- 1) при помощи трех однофазных трансформаторов;
- 2) при помощи трехфазного трансформатора.

Трехфазный трансформатор меньше по массе и габаритам группы из трех однофазных трансформаторов. Однако один однофазный трансформатор из трехфазной группы меньше по массе и габаритам и легче транспортируется, чем трехфазный трансформатор на полную мощность. Кроме того, при группе однофазных трансформаторов в качестве резерва достаточно иметь один запасной трансформатор (1/3 общей мощности), в то время как при одном трехфазном трансформаторе для резерва нужно иметь другой трансформатор на полную мощность. Преимущества группы однофазных трансформаторов сказываются при больших мощностях. Наоборот, трансформаторы средней и малой мощности выполняются обычно как трехфазные (трехстержневые).

В процессе работы трансформаторы нагреваются, поэтому в трансформаторах применяется радиаторная система охлаждения: бак трансформатора заполняется минеральным маслом, которое служит для отвода тепла от нагревающихся обмоток и магнитопровода. Одновременно масло является дополнительной изоляцией между обмотками и заземленными частями трансформатора.

6.5. Коэффициент полезного действия трансформатора

Коэффициент полезного действия (КПД) трансформатора определяется по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%, \quad (244)$$

где P_2 – мощность на выходе вторичной обмотки, P_1 – подводимая мощность.

$$P_1 = P_2 + \Sigma \Delta P, \quad (245)$$

где $\Sigma \Delta P$ – суммарные потери мощности.

Суммарные потери мощности складываются:

1) из электрических, или тепловых, потерь из-за наличия активного сопротивления первичной и вторичной обмоток трансформатора ($I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2$);

2) из потерь в стали, обусловленных перемагничиванием магнитопровода.

КПД трансформатора в номинальном режиме обычно составляет от 80 до 95%.

Контрольные вопросы по трансформаторам

1. На каком законе основан принцип действия трансформатора?

- 1) на законе Ома;
- 2) на законе электромагнитной индукции;
- 3) на законе Ленца.

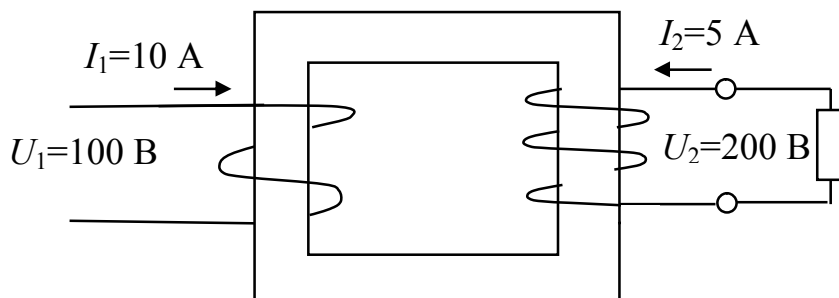
2. С какой целью на электростанциях в начале линии электропередачи (ЛЭП) устанавливаются повышающие трансформаторы?

- 1) для уменьшения расхода провода на ЛЭП;
- 2) для повышения коэффициента мощности системы;
- 3) для уменьшения потерь мощности в проводах ЛЭП;
- 4) для уменьшения капитальных затрат на сооружение ЛЭП.

3. При каком напряжении целесообразно: а) передавать электроэнергию; б) потреблять электроэнергию?

- 1) а) высоким, б) низким;
- 2) а) низким, б) высоким;
- 3) это зависит от характера тока.

4. Какой это трансформатор?



1) понижающий, так как ток во вторичной обмотке меньше тока в первичной обмотке;

2) повышающий, так как напряжение во вторичной обмотке больше напряжения в первичной обмотке.

5. Чему равно отношение напряжений на зажимах первичной и вторичной обмоток в режиме холостого хода трансформатора?

1) отношению числа витков обмоток;

2) приближенно отношению числа витков обмоток.

6. Может ли напряжение на зажимах вторичной обмотки превышать:

а) ЭДС E_1 первичной обмотки; б) ЭДС E_2 вторичной обмотки?

1) а) может, б) может;

2) а) не может, б) не может;

3) а) может, б) не может;

4) а) не может, б) может.

7. Какое уравнение связывает магнитный поток в сердечнике трансформатора с действующим значением ЭДС в обмотке трансформатора?

1) $e = E_m \cdot \sin \omega t$;

2) $d\Phi = -\frac{E_m}{\omega} \cdot \sin \omega t dt$;

3) $E = 4,44 f \omega \Phi$;

4) другое уравнение.

8. Для какого режима работы трансформатора коэффициент трансформации можно определить по отношению напряжений вторичной и первичной обмоток?

1) для режима короткого замыкания;

2) для режима холостого хода;

3) для нагрузочного режима.

9. Как изменяется ток первичной обмотки трансформатора при увеличении тока вторичной обмотки?

1) остается неизменным;

2) увеличивается;

3) уменьшается.

10. Как изменяется величина магнитного потока в магнитопроводе трансформатора при увеличении нагрузки во вторичной обмотке?

1) остается неизменной;

2) увеличивается;

3) уменьшается.

11. В каких режимах работают первичная и вторичная обмотки трансформатора?

- 1) первичная и вторичная в режиме генератора;
- 2) первичная и вторичная в режиме приемника энергии;
- 3) первичная в режиме генератора, вторичная в режиме приемника энергии;
- 4) первичная в режиме приемника энергии, вторичная в режиме генератора.

12. Первичная обмотка трансформатора имеет $w_1=600$ витков, коэффициент трансформации $K_{TP}=20$. Определить число витков вторичной обмотки.

- 1) 30; 2) 0,03; 3) 12000; 4) 100.

13. В трансформаторе, понижающем напряжение с 220 В до 6,3 В, применены проводники сечением $S_1=1 \text{ мм}^2$ и $S_2=9 \text{ мм}^2$. Обмотке высшего или низшего напряжения принадлежит провод сечением $S_1=1 \text{ мм}^2$?

- 1) обмотке высшего напряжения;
- 2) обмотке низшего напряжения.

14. Для преобразования напряжения в начале и в конце ЛЭП установили трансформаторы с коэффициентом трансформации $K_{TP}=26$. Во сколько раз уменьшатся потери в проводах ЛЭП, если передаваемая мощность и сечение проводов остались такими же, как до установки трансформаторов?

- 1) 676; 2) 52; 3) 13; 4) 10.

15. Какие уравнения соответствуют работе однофазного трансформатора с нагрузкой?

- 1) $\overline{U}_1 = \overline{E}_1 - \overline{I}_1 \overline{Z}_1$, $\overline{U}_2 = \overline{E}_2 + \overline{I}_2 \overline{Z}_2$;
- 2) $\overline{U}_1 = \overline{E}_1 + \overline{I}_1 \overline{Z}_1$, $\overline{U}_2 = \overline{E}_2 - \overline{I}_2 \overline{Z}_2$;
- 3) $\overline{U}_1 = \overline{E}_1 - \overline{I}_1 \overline{Z}_1$, $\overline{U}_2 = \overline{E}_2 - \overline{I}_2 \overline{Z}_2$;
- 4) $\overline{U}_1 = \overline{E}_1 + \overline{I}_1 \overline{Z}_1$, $\overline{U}_2 = \overline{E}_2 + \overline{I}_2 \overline{Z}_2$.

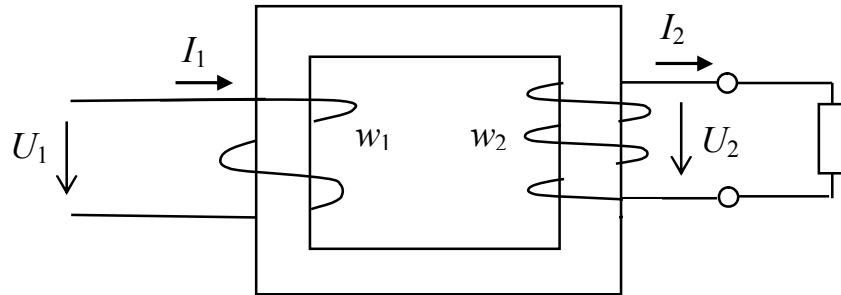
16. Как изменится магнитный поток в сердечнике трансформатора при возрастании тока во вторичной обмотке в три раза?

- 1) увеличится в три раза;
- 2) уменьшится в три раза;
- 3) останется неизменным.

17. Число витков в каждой фазе первичной обмотки трехфазного трансформатора $w_1=1000$, в каждой фазе вторичной обмотки $w_2=200$. Линейное напряжение питающей сети равно 1000 В. Определить линейное напряжение на выходе трансформатора при условии, что первичная и вторичная обмотки соединены по схеме «звезда».

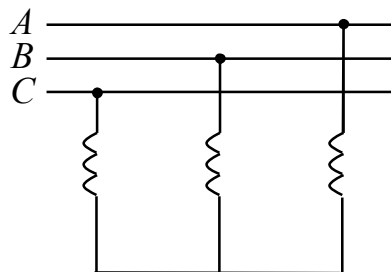
1) 200 В; 2) 5000 В; 3) для решения задачи недостаточно данных.

18. В каком уравнении для трансформатора допущена ошибка?



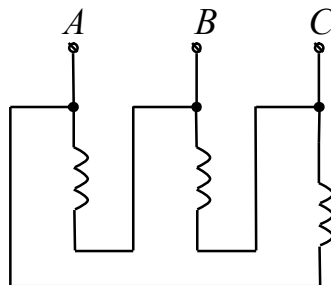
- 1) $\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 + \bar{I}_1 Z_1$; 2) $\bar{U}_2 = \bar{E}_2 - \bar{I}_2 Z_2$;
 3) $E_1 = 4,44 f_1 w_1 \Phi$; 4) $E_2 = 4,44 f_1 w_2 \Phi$.

19. Как соединены эти обмотки трансформатора?



1) «звездой»; 2) «треугольником»; 3) другим способом.

20. Как соединены эти обмотки трансформатора?



1) «звездой»; 2) «треугольником»; 3) другим способом.

7. ЭЛЕКТРОНИКА

7.1. Полупроводниковые диоды

В полупроводниковых диодах используются специфические явления, возникающие на границе двух полупроводников с разным типом проводимости: p и n (рис. 111).

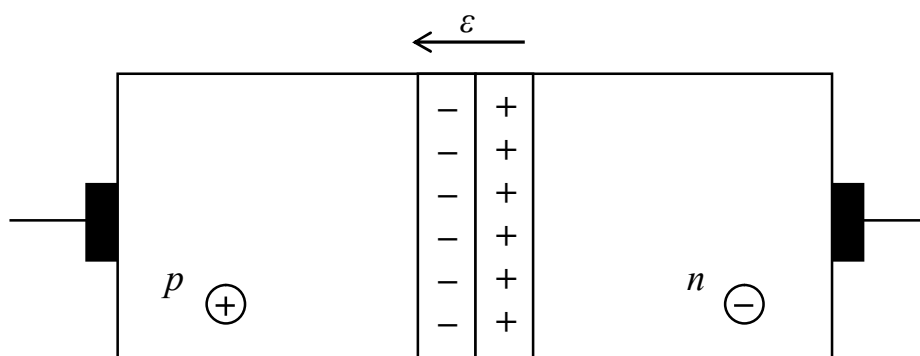


Рис. 111. Распределение носителей зарядов на границе двух полупроводников с разным типом проводимости при отсутствии приложенного напряжения

В полупроводнике n -типа основными носителями зарядов являются электроны, а в полупроводнике p -типа – дырки.

Вследствие разности концентраций свободных дырок и электронов по обе стороны от границы полупроводников при разомкнутой цепи источника энергии из полупроводника n -типа часть электронов диффундирует в полупроводник p -типа, а из полупроводника p -типа часть дырок диффундирует в полупроводник n -типа. В результате этого на границе полупроводников образуется слой из неподвижных отрицательных и положительных объемных зарядов, между которыми возникает электрическое поле напряженностью ε . При некотором значении напряженности электрического поля в p - n переходе диффузия через границу полностью прекращается, т.е. возникает запирающий слой.

Если к диоду приложить напряжение в прямом направлении (*прямое напряжение*), то под действием электрического поля напряженностью ε_1 , возникающего между электродами за счет действия внешнего источника напряжения, произойдет уменьшение напряженности электрического поля ε в области p - n перехода, что приведет к открыванию диода (рис. 112). При этом через диод будет протекать *прямой ток*, обусловленный основными носителями зарядов.

Если к диоду приложить напряжение в обратном направлении (*обратное напряжение*), то под действием электрического поля внешнего

источника напряжения напряженностью ε_1 , возникающего между электродами за счет действия внешнего источника напряжения, произойдет увеличение напряженности электрического поля ε в области p - n перехода, что приведет к увеличению запирающего слоя и к закрытию диода (рис. 113). При этом через диод будет протекать незначительный обратный ток, обусловленный неосновными носителями зарядов.

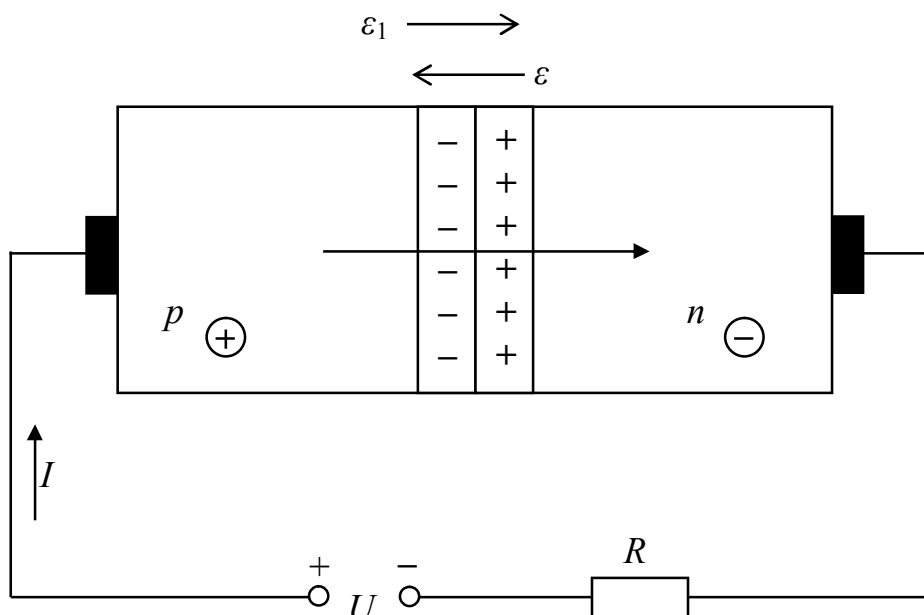


Рис. 112. Протекание тока через полупроводники с разным типом проводимости при приложенном прямом напряжении (R – токоограничивающее сопротивление)

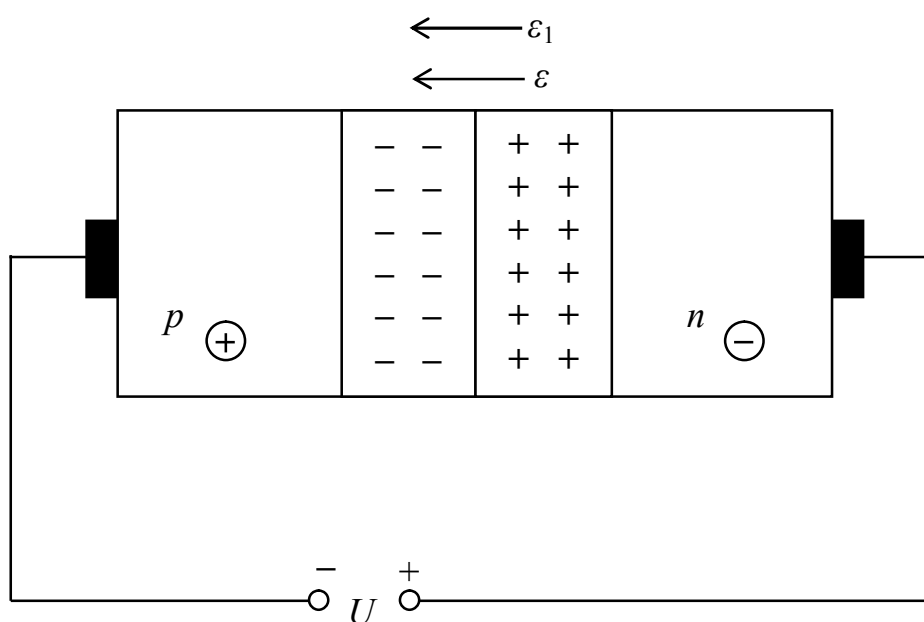


Рис. 113. Распределение носителей зарядов на границе двух полупроводников с разным типом проводимости

при приложенном обратном напряжении

Таким образом, в полупроводниковых диодах используется свойство p - n перехода проводить ток практически в одном направлении.

На электрической схеме графическое изображение диода указывает направление протекания прямого тока (рис. 114), который направлен от положительного электрода (типа p) к отрицательному электроду (типа n). Положительный электрод называется анодом (A), отрицательный – катодом (K).

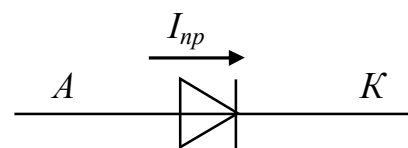


Рис. 114. Графическое изображение диода

Работа полупроводникового диода характеризуется вольт-амперной характеристикой (рис. 115).

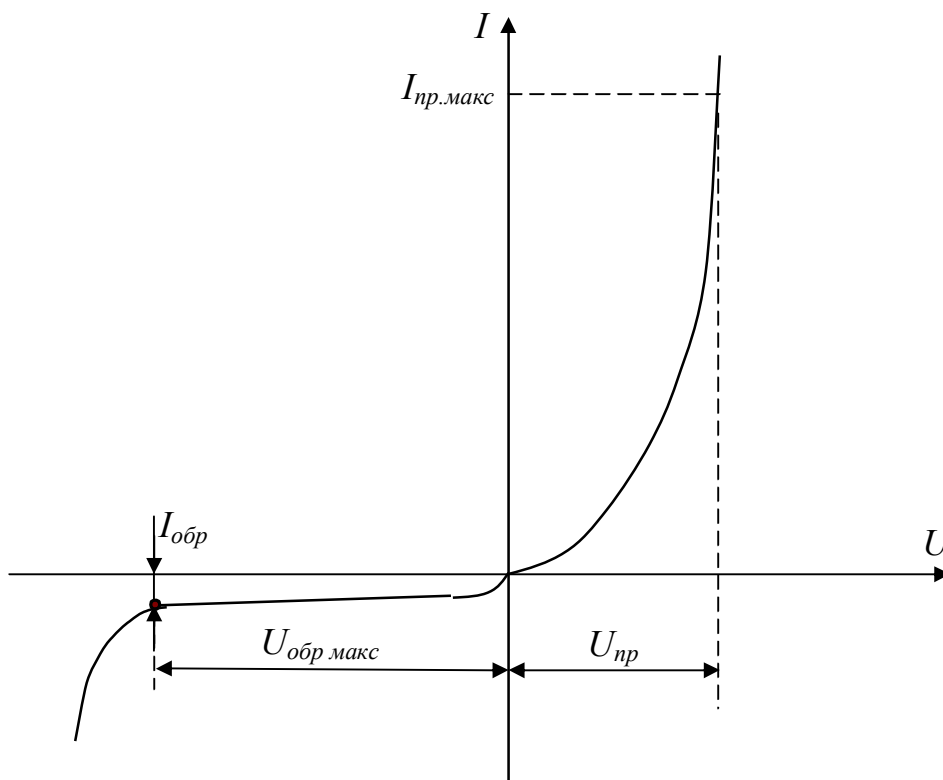


Рис. 115. Вольт-амперная характеристика диода

Нагрузочную способность диода определяют предельно допустимый прямой ток $I_{np.макс}$ и предельно допустимое обратное напряжение $U_{обр.макс}$. Обратный ток диода $I_{обр}$ очень мал (единицы или десятки мкА) и практически не учитывается. Если же $U_{обр}$ превысит предельно допустимое значение, произойдет резкое (лавинное) увеличение обратного тока, что приведет к необратимому пробое диода и выходу его из строя. Поэтому при работе диодов в выпрямительных схемах $U_{обр}$ не должно превышать предельно допустимого значения. Чтобы прямой ток не превышал

допустимого значения, последовательно с диодом должно быть включено токоограничивающее сопротивление (или какая-то нагрузка). Падение напряжения на открытом диоде U_{np} невелико и составляет обычно (0,5–1,5) В.

В зависимости от предельно допустимой частоты тока и напряжения различают низкочастотные, среднечастотные и высокочастотные диоды.

7.2. Выпрямители переменного тока

7.2.1. Основные понятия

Выпрямителем называют устройство с электрическими вентилями (диодами), предназначенное для преобразования энергии переменного тока в энергию постоянного тока.

На базе выпрямителей построены схемы преобразователей напряжения для питания радиоэлектронной аппаратуры. Мощные выпрямители применяются в электроприводе для питания двигателей постоянного тока.

Классическая схема преобразователя переменного напряжения в постоянное (рис. 116) состоит из трансформатора Tr , вентилей B , сглаживающего фильтра $СФ$.

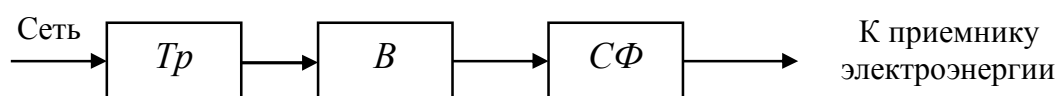


Рис. 116. Блок-схема преобразователя переменного напряжения в постоянное

Трансформатор (обычно понижающий) изменяет величину переменного напряжения до необходимой величины. Вентили (диоды) образуют выпрямительную схему, преобразующую переменное напряжение в пульсирующее (постоянной полярности, но переменной величины). Сглаживающий фильтр уменьшает пульсацию выпрямленного напряжения. Иногда трансформатор или сглаживающий фильтр в преобразователе напряжения может отсутствовать.

Пульсирующее напряжение на выходе выпрямителя имеет сложную форму. Его можно представить в виде суммы постоянной и переменной составляющих. Переменная составляющая содержит гармоники основной частоты и кратных ей частот (высшие гармоники).

Важными параметрами выпрямителя являются: постоянная составляющего выпрямленного напряжения U_0 , постоянная составляющего выпрямленного тока I_0 , коэффициент пульсаций, равный отношению

амплитуды переменной составляющей основной частоты выпрямленного напряжения к его постоянной составляющей

$$K_n = \frac{U_{осн.мах}}{U_0} \quad (246)$$

Варианты выпрямительных схем отличаются числом фаз переменного напряжения, схемой соединения вентилей, формой выпрямленного напряжения и другими особенностями.

7.2.2. Однополупериодный выпрямитель

Однополупериодный выпрямитель состоит из одного диода, включенного последовательно с нагрузкой (рис. 117).

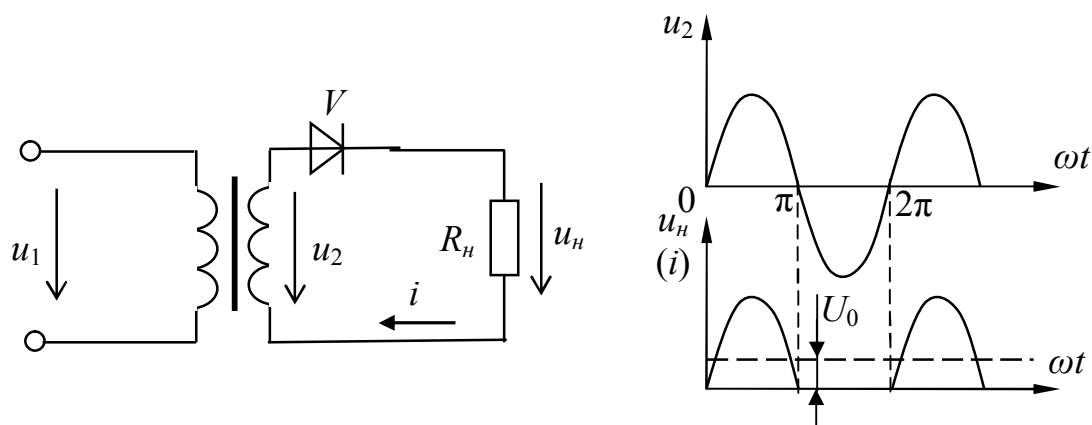


Рис. 117. Электрическая схема и форма напряжений однополупериодного выпрямителя

Ток через диод и сопротивление нагрузки протекает только в течение одной половины периода, когда к диоду приложено напряжение в прямом направлении (см. рис. 117). При обратном напряжении на диоде в течение второй половины периода (от π до 2π) диод закрыт. Таким образом, с выхода выпрямителя снимаются импульсы, создающие напряжение u_n и ток i , пульсирующие с частотой питающего напряжения u_1 . Выпрямленное пульсирующее напряжение можно представить как сумму переменной и постоянной составляющих этого напряжения. Постоянная составляющая выпрямленного напряжения U_0 равна среднему за период значению выпрямленного напряжения

$$U_0 = \frac{\sqrt{2}U_2}{\pi} \approx 0,45 U_2. \quad (247)$$

Среднее значение тока диода равно среднему току нагрузки, т.е. его постоянной составляющей

$$I_0 = I_d = I_n = 0,45 \frac{U_2}{R_n}. \quad (248)$$

Недостатком данного выпрямителя является большое значение коэффициента пульсаций $K_n \approx 1,57$. Кроме этого, мощность трансформатора у такого выпрямителя используется не полностью.

Однополупериодные выпрямители применяются редко и лишь при небольшой мощности нагрузки.

7.2.3. Двухполупериодный выпрямитель

Лучшими свойствами обладает двухполупериодный выпрямитель, который бывает двух типов: с выводом от средней точки вторичной обмотки трансформатора и мостовой.

Мостовой выпрямитель (рис. 118) имеет четыре диода.

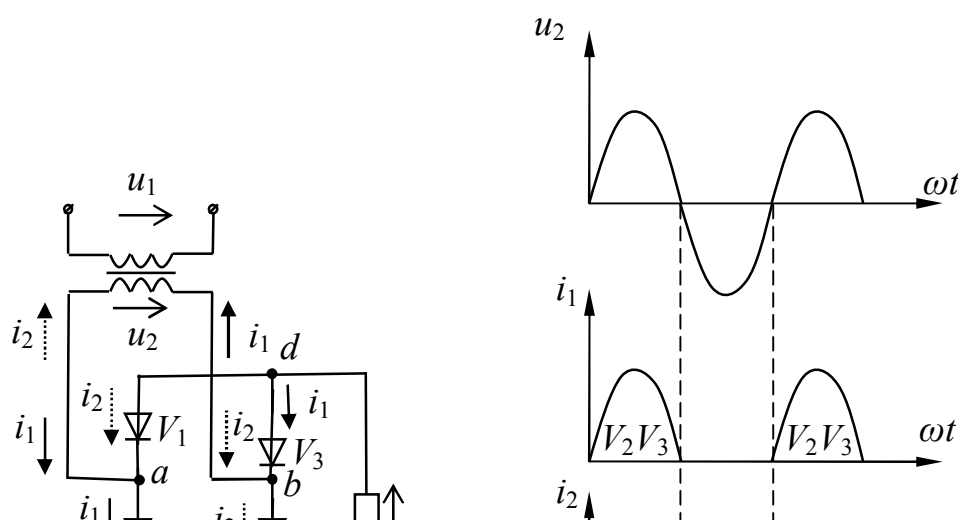


Рис. 118. Электрическая схема и форма напряжений и токов однофазного мостового выпрямителя

В мостовой выпрямительной схеме диоды работают попарно через полпериода. Соответствующая пара диодов открыта, когда к каждому из них приложено напряжение в прямом направлении (см. рис. 118). В это время другая пара диодов закрыта.

Под действием обеих полувольт входного напряжения через сопротивление нагрузки ток всегда протекает в одном направлении независимо от полярности этого напряжения (см. рис. 118).

$$i = i_1 + i_2. \quad (249)$$

Среднее значение напряжения на нагрузке в этой схеме в два раза больше, чем в схеме однополупериодного выпрямителя,

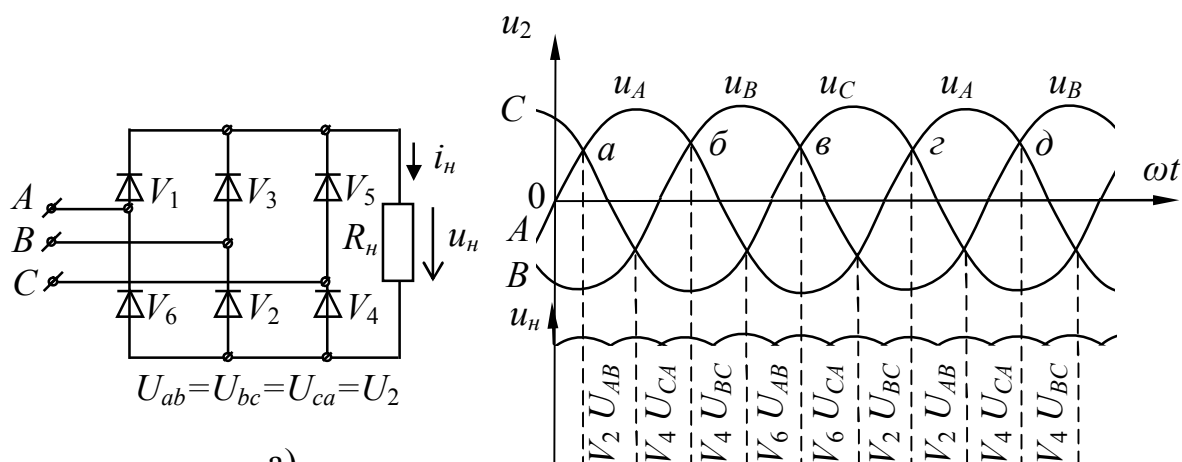
$$U_0 \approx 0,9 U_2, \quad (250)$$

а коэффициент пульсаций

$$K_n \approx 0,67. \quad (251)$$

Мостовые выпрямители являются наиболее распространенными.

Мощные выпрямители обычно выполняются по многофазным схемам, преимуществом которых являются равномерная загрузка фаз питающей сети и малые значения коэффициента пульсаций. Одной из самых распространенных выпрямительных схем такого рода является трехфазная мостовая схема (рис. 119).



Выпрямитель состоит из шести диодов. В любой момент времени ток проводят два диода, на анодах которых в данный момент времени будет максимальный положительный потенциал, а на катодах – максимальный отрицательный потенциал (см. рис. 119). Из приведенной временной диаграммы видно, что каждый диод проводит ток в течение одной трети периода.

Постоянная составляющая выпрямленного напряжения для такой схемы

$$U_0 \approx 1,35 U_2. \quad (252)$$

Из всех рассмотренных выпрямителей трехфазный мостовой выпрямитель имеет наименьший коэффициент пульсаций

$$K_n \approx 0,057, \quad (253)$$

что позволяет применять такой выпрямитель без сглаживающего фильтра.

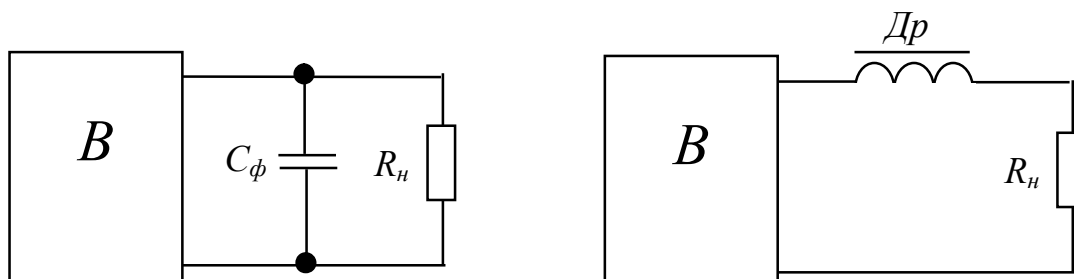
7.2.4. Сглаживающие фильтры

Однофазные выпрямители обычно снабжаются сглаживающими фильтрами, снижающими коэффициент пульсаций до допустимого значения. Эффективность фильтра оценивается коэффициентом сглаживания

$$q = \frac{K_n}{K_{n\phi}}, \quad (254)$$

где K_n – коэффициент пульсаций выпрямителя без фильтра; $K_{n\phi}$ – коэффициент пульсаций выпрямителя с фильтром.

Простейший емкостный фильтр состоит из конденсатора, включенного на выходе выпрямителя параллельно нагрузке (рис. 120).



а)

б)

в)

г)

Рис. 120. Электрические схемы сглаживающих фильтров: емкостного (а); дроссельного (б); П-образного LC -фильтра (в) и форма напряжения на нагрузке двухполупериодного выпрямителя с емкостным сглаживающим фильтром (г)

Действие конденсатора как элемента фильтра заключается в том, что в интервалы времени от 0 до $\frac{\pi}{2}$, от π до $3\frac{\pi}{2}$, когда пульсирующее напряжение на выходе выпрямителя нарастает, конденсатор заряжается (см. рис. 120). При спаде выпрямленного напряжения (интервалы от $\frac{\pi}{2}$ до π , от $3\frac{\pi}{2}$ до 2π) конденсатор, отдавая накопленную энергию, разряжается через нагрузку. Ток разряда конденсатора по направлению совпадает с током нагрузки в интервалы времени от 0 до $\frac{\pi}{2}$, от π до $3\frac{\pi}{2}$ и тем самым компенсирует уменьшение тока нагрузки, вызванное спадом выпрямленного напряжения. Чем больше емкость конденсатора, тем больше время разряда и тем меньше пульсации.

Чем больше частота питающего напряжения на входе выпрямителя, тем лучше протекает процесс сглаживания, так как емкостное сопротивление по переменным составляющим выпрямленного тока становится меньше. Эти составляющие тока протекают через конденсатор.

Сглаживающее действие дросселя (см. рис. 120) основано на том, что его индуктивное сопротивление для основной гармоники переменной составляющей выпрямленного тока во много раз больше сопротивления

нагрузки. Поэтому основная часть переменной составляющей выпрямленного тока уменьшается дросселем. По постоянной составляющей сопротивление дросселя незначительно. Следовательно, напряжение нагрузки U_n будет определяться в основном постоянной составляющей. Дроссельный фильтр более эффективен при больших токах нагрузки.

Лучшими сглаживающими свойствами обладают комбинированные сглаживающие фильтры (Г-образные и П-образные), в которых процесс сглаживания осуществляется одновременно как дросселем, так и конденсаторами (см. рис. 120).

7.3. Тиристоры

Тиристор – это полупроводниковый прибор с двумя устойчивыми состояниями, способный проводить ток в одном направлении. Наиболее распространена структура тиристора с четырьмя чередующимися слоями полупроводников p - и n -типов (рис. 121).

Различают управляемые, или триодные, и неуправляемые, или диодные, тиристоры.

Диодный тиристор имеет два вывода: анодный A и катодный K (см. рис. 121).

Если между анодом и катодом тиристора приложить небольшое постоянное напряжение в прямом направлении, то p - n переходы $П1$ и $П3$ окажутся открытыми и их сопротивление будет мало. Для p - n перехода $П2$ приложенное напряжение является обратным, поэтому электрическое поле в области перехода $П2$ возрастет, его сопротивление будет велико. Таким образом, все приложенное к тиристорному напряжению окажется приложено к переходу $П2$ и ток в цепи практически равен нулю. При повышении напряжения на тиристоре ток в цепи увеличивается незначительно.

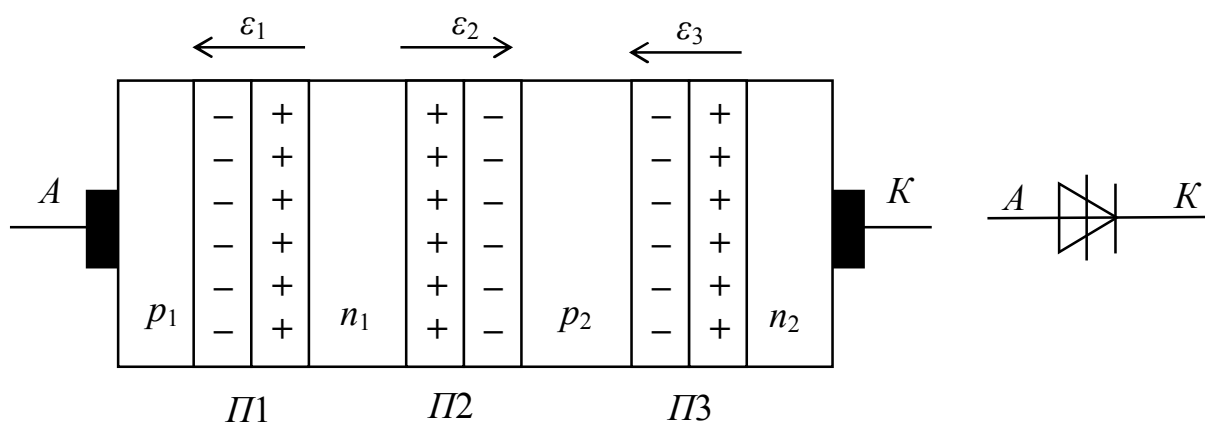


Рис. 121. Структура диодного тиристора и его условное

графическое изображение на схеме

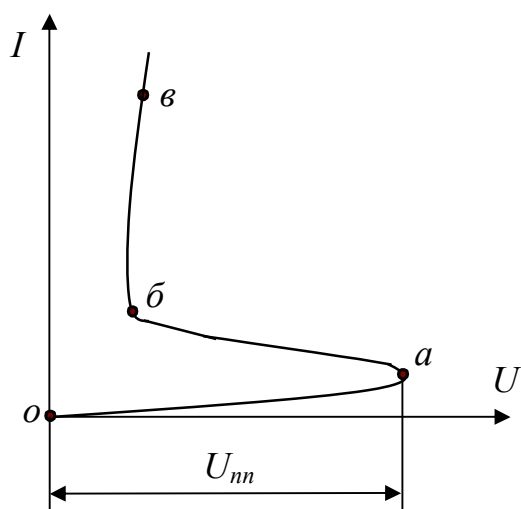


Рис. 122. Вольт-амперная характеристика диодного тиристора

При достижении напряжением определенного значения, называемого напряжением пробоя U_{nn} , в переходе $\Pi 2$ напряженность электрического поля становится достаточной для ионизации и образования новых свободных носителей зарядов, при этом сопротивление перехода $\Pi 2$ резко уменьшается и тиристор открывается (рис. 122).

Ввиду незначительного внутреннего сопротивления открытого тиристора падение напряжения на нем (участок $бв$ вольт-амперной характеристики) составляет всего 1–2 В. Ток, протекающий через тиристор,

В отличие от диодного триодный тиристор имеет три электрода: A – анод, K – катод и Y – управляющий электрод (рис. 123).

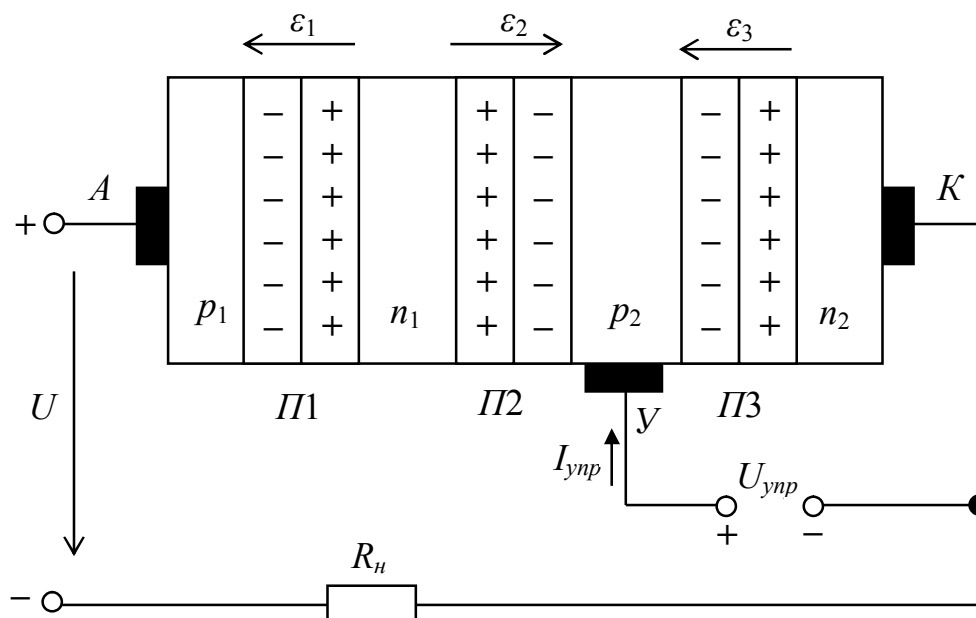


Рис. 123. Структура триодного тиристора

Управляющим является один из электродов, примыкающих к закрытому p - n переходу. В зависимости от этого триодные тиристоры имеют различное условное графическое изображение на схеме (рис. 124).



Рис. 124. Условное графическое изображение триодного тиристора:
а – с управлением по аноду; б – с управлением по катоду

Между анодом и катодом тиристора подается напряжение U питания нагрузки R_n (см. рис. 123), величина которого меньше напряжения прямого пробоя U_{nn} (напряжения включения). При этом тиристор закрыт (рис. 125). При подаче на управляющий электрод положительного потенциала U_{ynp} от источника управления в p - n переходе $ПЗ$ возникает ток управления I_{ynp} и появляются дополнительные носители зарядов, которые проникают в область закрытого p - n перехода $П2$ и вызывают ионизацию, что приводит к открыванию перехода $П2$, в результате чего через тиристор протекает ток (см. рис. 125). Чем больше ток управления I_y , тем больше дополнительных носителей зарядов появляется в области перехода $П2$, что способствует открыванию тиристора при меньшем напряжении U_{nn} между анодом и катодом.

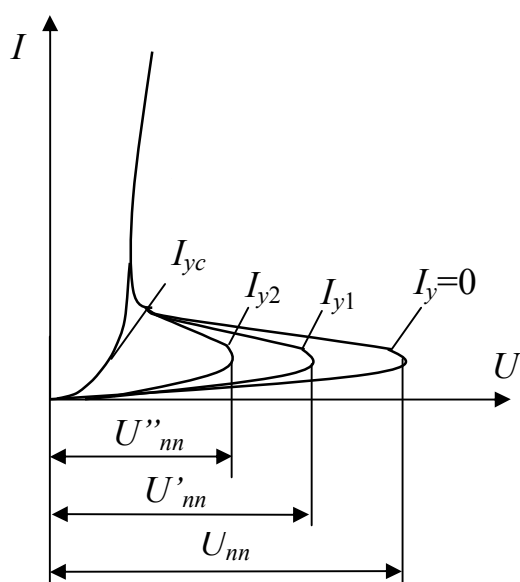


Рис. 125. Вольт-амперные характеристики триодного тиристора

При определенном значении тока управления I_{yc} , называемом током сглаживания, тиристор будет работать как неуправляемый диод (см. рис. 125).

Таким образом, тиристор может открываться двумя способами:

- подачей между анодом и катодом напряжения пробоя U_{nn} ;
- при напряжении, меньшем U_{nn} , током I_y управления достаточной величины.

Так как управляющий электрод после открытия тиристора перестает оказывать влияние на его работу, то в цепь управляющего электрода обычно подается короткий импульс длительностью около 10 мкс. Ток

ставляет 1–2% от тока основной цепи.

Тиристор закрывается, когда напряжение между анодом и катодом становится равным нулю или изменяется его полярность на противоположную.

Таким образом, тиристор имеет два устойчивых состояния: закрытое, при котором его сопротивление очень велико, и открытое, при котором его сопротивление практически равно нулю. Благодаря этому свойству тиристоры применяются для бесконтактной коммутации цепей и в схемах управляемых выпрямителей.

7.4. Управляемые выпрямители

Управляемый выпрямитель – это выпрямитель, на выходе которого величина напряжения может изменяться по заданному закону. В таких выпрямителях вместо диодов применяются триодные тиристоры, позволяющие изменять момент их перехода в открытое состояние. Переход тиристора из закрытого состояния в открытое происходит под действием управляющего импульса.

Простейшим тиристорным выпрямителем является однополупериодный (рис. 126). В основную цепь тиристора между анодом и катодом подается переменное напряжение, амплитуда которого меньше напряжения включения тиристора. Поэтому при отсутствии управляющего импульса тиристор закрыт.

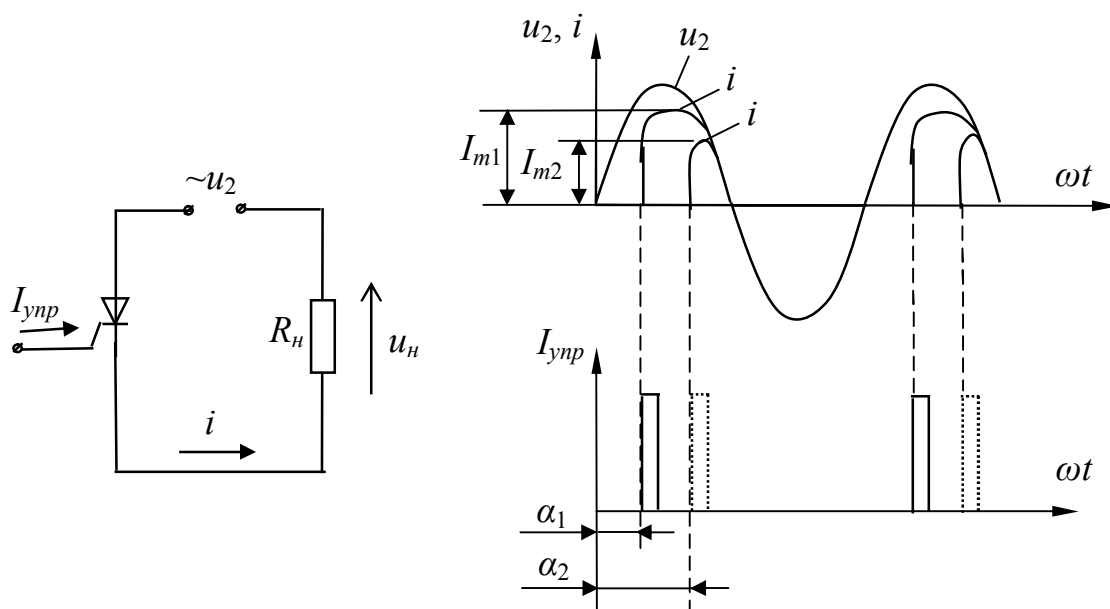


Рис. 126. Электрическая схема и временные диаграммы однополупериодного тиристорного выпрямителя

При наличии прямого напряжения между анодом и катодом и при подаче импульса в цепь управления тиристор открывается и будет открыт до тех пор, пока напряжение u_2 не станет равным нулю (см. рис. 126). Угол α (α_1 , α_2) называется углом отпирания тиристора. При изменении угла отпирания изменяется амплитудное значение тока I_m , протекающего через тиристор и сопротивление нагрузки, а следовательно, изменяются среднее значение выпрямленного тока, т.е. постоянная составляющая тока нагрузки, и напряжение на нагрузке.

Нетрудно заметить, что средняя величина выпрямленного напряжения будет тем больше, чем меньше угол α отпирания тиристора. Если пренебречь падением напряжения на тиристоре, то зависимость среднего напряжения на нагрузке от угла отпирания определяется по выражению

$$U_0 = \frac{\sqrt{2} U_2}{2\pi} (1 + \cos \alpha). \quad (255)$$

Таким образом, изменяя угол α от π до нуля, можно регулировать напряжение на нагрузке от нуля до максимальной величины, составляющей $0,45 U_2$, где U_2 – действующее значение переменного напряжения.

7.5. Регулятор переменного тока

Регулятор содержит два триодных тиристора D_1 и D_2 , включенных встречно-параллельно (рис. 127).

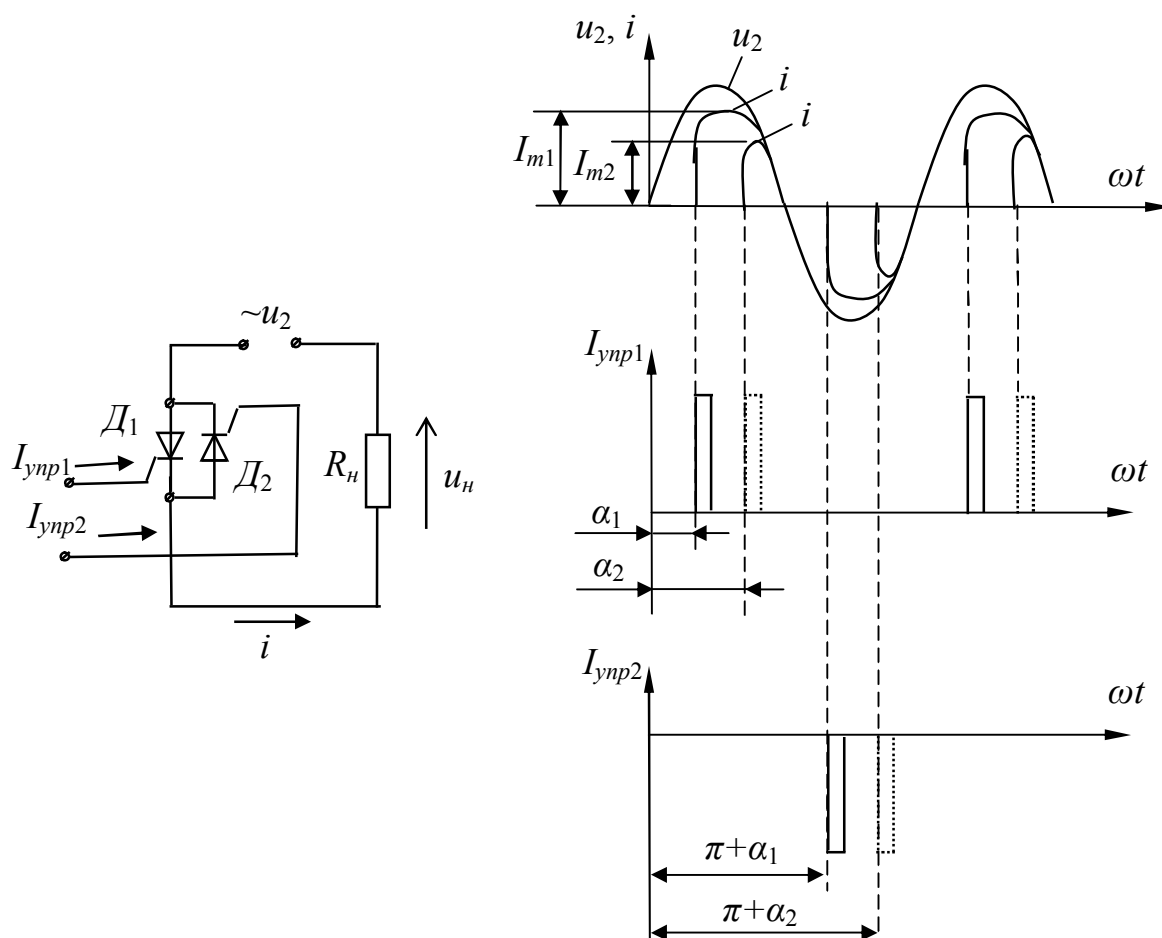


Рис. 127. Регулятор переменного тока на двух тиристорах и его временная диаграмма

В момент времени, соответствующий фазовому сдвигу $\alpha_1 = \omega t$, управляющий импульс I_{ynp1} поступает на тиристор D_1 , анод которого имеет положительный потенциал относительно катода. Тиристор D_1 открывается, в результате чего в течение времени $\frac{\pi - \alpha_1}{\omega}$ через сопротивление нагрузки R_n протекает ток. В следующую половину периода управляющий импульс I_{ynp2} поступает на тиристор D_2 , который пропускает ток через сопротивление нагрузки R_n с момента времени $\pi + \alpha_1$ до момента 2π (т.е. в течение времени $\frac{2\pi}{\omega} - \frac{\pi + \alpha_1}{\omega} = \frac{\pi - \alpha_1}{\omega}$, как и тиристор D_1).

Таким образом, ток и, следовательно, напряжение на сопротивлении нагрузки R_n являются переменными и имеют форму усеченных полувольт синусоиды. Действующее значение этого напряжения зависит от угла отпирания

$$U_n = \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}. \quad (256)$$

Обычно в регуляторах переменного тока используют специальные симметричные тиристоры, называемые симисторами. Симистор представляет собой два встречно-параллельно включенных тиристора с общим выводом управляющих электродов, выполненных в одном монокристалле кремния. Регулятор на симисторе (рис. 128) обладает такими же свойствами, что и регулятор на двух тиристорах.

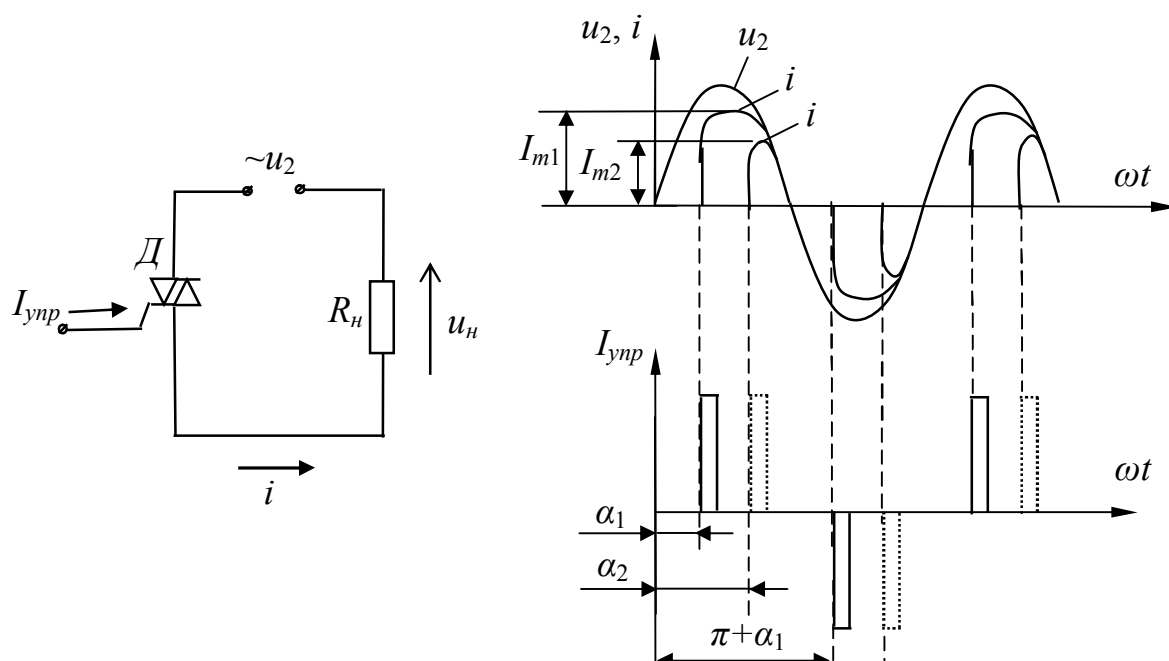


Рис. 128. Регулятор переменного тока на симисторе и его временная диаграмма

Для управления симистором используются импульсы различной полярности.

7.6. Биполярные транзисторы

Работа биполярных транзисторов основана на явлениях взаимодействия двух близко расположенных p - n переходов. Различают плоскостные и точечные биполярные транзисторы.

Плоскостной биполярный транзистор представляет собой трехслойную структуру типа p - n - p или типа n - p - n (рис. 129).

Транзистор называется биполярным потому, что физические процессы в нем связаны с движением носителей заряда обоих знаков (свободных дырок и электронов).

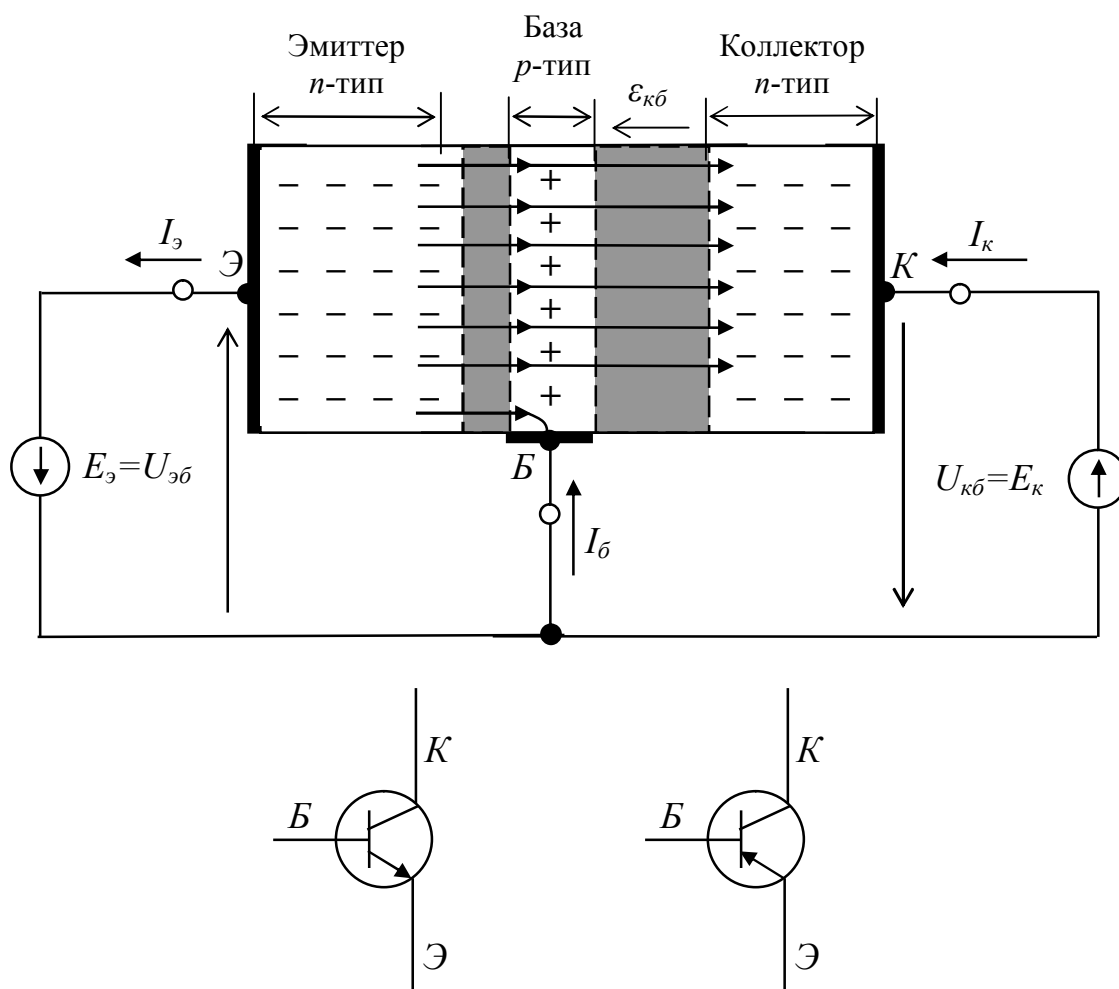


Рис. 129. Структура транзистора $n-p-n$ и условное графическое изображение транзисторов типа $n-p-n$ и $p-n-p$ на схеме

Средний слой транзистора называется базой B , один крайний слой – коллектором K , а другой крайний слой – эмиттером $\mathcal{E}$. Каждый слой представляет собой электрод и имеет вывод. Посредством выводов транзистор включается в схему. В схемах транзисторных усилителей полярность напряжения E_K должна быть такой, чтобы коллекторный $p-n$ переход был закрыт для основных носителей заряда (см. рис. 129). Таким образом, напряжение E_K является обратным для коллекторного $p-n$ перехода.

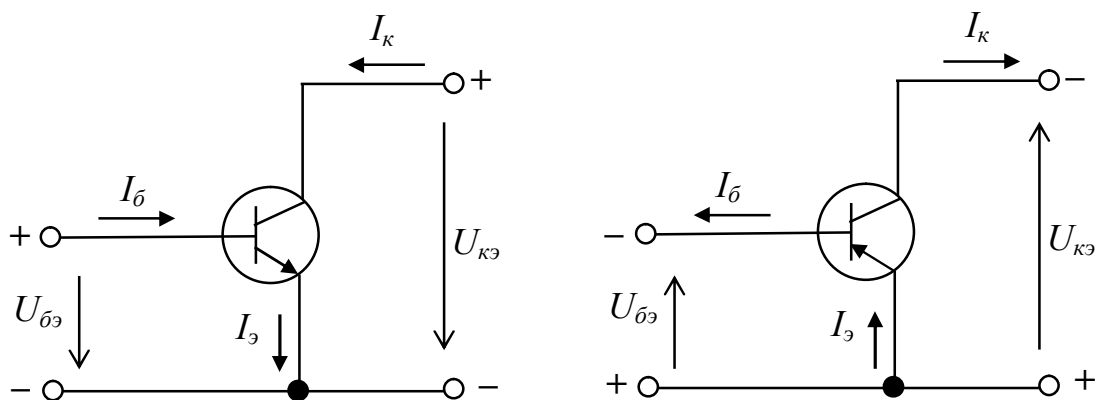
Полярность напряжения $E_{\mathcal{E}}$ должна быть такой, чтобы эмиттерный $p-n$ переход был открыт. Свободные электроны диффундируют из эмиттера в базу, создавая ток эмиттера $I_{\mathcal{E}}$. Если между коллектором и базой включен источник питания E_K , то большая часть электронов, поступивших из эмиттера в базу, втягивается сильным электрическим полем с напряженностью $\mathcal{E}_{K\mathcal{B}}$ коллекторного $p-n$ перехода, создавая ток цепи коллектора I_K . Незначительная часть свободных электронов, поступивших из эмиттера в базу, образует ток базы $I_{\mathcal{B}}$. Таким образом,

$$I_{\mathcal{E}} = I_K + I_{\mathcal{B}}. \quad (256)$$

В рассмотренном случае база является общим электродом для входной и выходной цепей. Такая схема включения биполярного транзистора называется схемой с общей базой (ОБ).

Однако чаще транзисторные каскады строятся по схемам с общим коллектором (ОК) и с общим эмиттером (ОЭ).

Наибольшее распространение на практике получила схема с общим эмиттером (рис. 130).



а) б)
 Рис. 130. Включение по схеме с общим эмиттером транзисторов:
а – типа *n-p-n*; *б* – типа *p-n-p*

Работу биполярного транзистора, включенного по такой схеме, определяют выходными статическими характеристиками $I_K = f(U_{KЭ})$ при $I_6 = \text{const}$ и входными статическими характеристиками $I_6 = f(U_{6Э})$ при $U_{K6} = \text{const}$ (рис. 131).

Биполярные транзисторы характеризуются *h*-параметрами. Эти параметры можно рассчитать по заданным статическим характеристикам. Каждый *h*-параметр имеет свой физический смысл.

Сопротивление со стороны входа транзистора

$$h_{11} = \frac{dU_{6Э}}{dI_6} \text{ при } U_{KЭ} = \text{const.} \quad (257)$$

Коэффициент передачи по напряжению

$$h_{12} = \frac{dU_{6Э}}{dU_{KЭ}} \text{ при } I_6 = \text{const.} \quad (258)$$

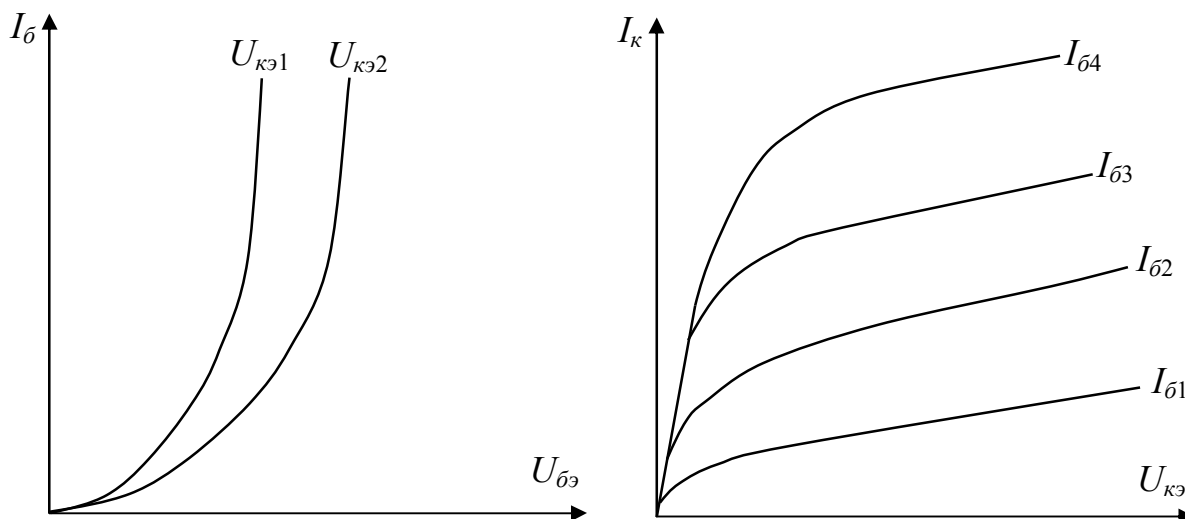
Коэффициент усиления по току

$$h_{21} = \frac{dI_K}{dI_6} \text{ при } U_{KЭ} = \text{const.} \quad (259)$$

Проводимость со стороны выхода транзистора

$$h_{22} = \frac{dI_K}{dU_{KЭ}} \text{ при } I_6 = \text{const.} \quad (260)$$

Численные значения *h*-параметров обычно составляют: $h_{11} = 10^3 \div 10^4$ Ом; $h_{12} = 2 \cdot 10^{-4} \div 2 \cdot 10^{-3}$; $h_{21} = 20 \div 200$; $h_{22} = 10^{-5} \div 10^{-6}$ См.



а) б)
 Рис. 131. Входные (а) и выходные (б) статические
 характеристики биполярного транзистора
 ($U_{кэ2} > U_{кэ1}$; $I_{б4} > I_{б3} > I_{б2} > I_{б1}$)

Основное преимущество биполярных транзисторов состоит в высоком быстродействии при достаточно больших токах коллектора.

Недостатком биполярных транзисторов является относительно небольшое входное сопротивление при включении по схеме с ОЭ.

В зависимости от предельно допустимой мощности рассеяния на коллекторе различают транзисторы малой, средней и большой мощности.

В зависимости от предельно допустимой частоты тока и напряжения различают низкочастотные, среднечастотные и высокочастотные транзисторы.

7.7. Нагрузочный режим работы биполярного транзистора

При работе транзисторов в усилителях используется нагрузочный (динамический) режим работы транзистора. Усилителями называются устройства, в которых с помощью малых изменений величины на их входе происходит управление значительно большими изменениями той же либо другой величины на их выходе. В усилителях управляющей величиной (входным сигналом) являются напряжение, ток или мощность, которые необходимо усилить, а управляемой величиной (выходным сигналом) являются

напряжение, ток или мощность, получаемые от независимого источника питания E_k (рис. 132).

Чтобы на выходе усилительного каскада получить выходной сигнал $u_{вых}$, изменяющийся в зависимости от входного сигнала $u_{вх}$, в коллекторную цепь транзистора T включается нагрузочное сопротивление R_k .

Уравнение нагрузочного режима для цепи коллектора имеет вид

$$U_{кэ} = E_k - I_k R_k. \quad (261)$$

При изменении входного сигнала $u_{вх}$ изменяется ток базы, что приводит к изменению тока цепи коллектора I_k , следовательно, изменяется напряжение на

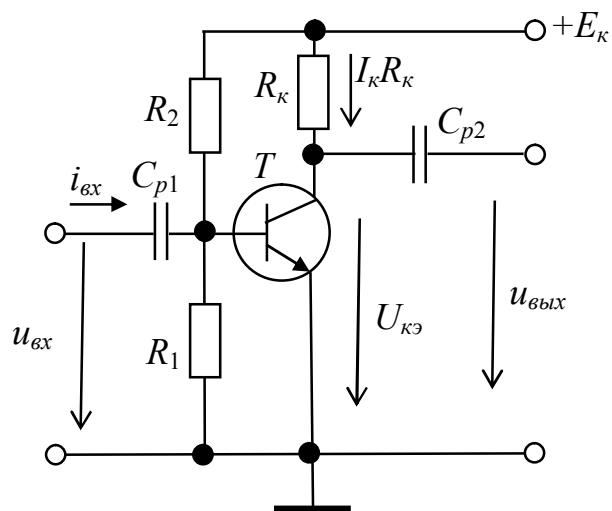
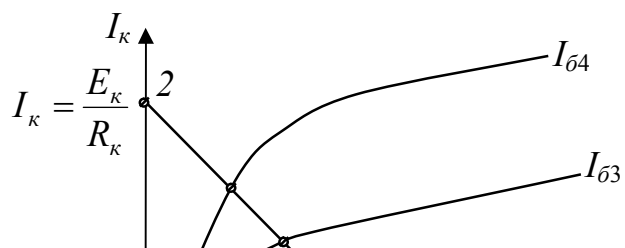


Рис. 132. Усилительный каскад на транзисторе



статических выходных характеристик транзистора (рис. 133).

Нагрузочная характеристика является прямой, не проходящей через начало координат. Для ее построения по уравнению нагрузочной характеристики ($U_{кэ} = E_k - I_k R_k$) определяются координаты двух точек, характеризующих два крайних режима работы транзистора (см. рис. 133):

$$1) I_k = 0, U_{кэ} = E_k; 2) U_{кэ} = 0, I_k = \frac{E_k}{R_k}.$$

Точки пересечения нагрузочной характеристики со статическими являются рабочими точками в усилительном каскаде при соответствующих токах базы.

Графоаналитический метод с использованием нагрузочной характеристики, построенной на семействе статических характеристик, широко применяется при анализе работы усилительных схем.

Ключевой режим работы транзистора от усилительного отличается тем, что транзистор может находиться только в двух состояниях: в состоянии отсечки, которому соответствует точка 1 на нагрузочной характеристике, и в состоянии насыщения, которому соответствует точка 2 (см. рис. 133). Особенность этого режима состоит в том, что на коллекторе транзистора рассеивается очень маленькая мощность, и поэтому, в отличие от усилительного режима, отпадает необходимость использования радиатора даже для мощных транзисторов. Мощность, рассеиваемая на коллекторе транзистора, можно определить по формуле

$$P_k = I_k^2 R_k, \quad (262)$$

где I_k – ток коллектора; R_k – сопротивление коллекторного перехода.

В режиме отсечки ток I_k очень мал, поэтому и мощность P_k также мала. В режиме насыщения ток I_k достигает максимального значения, но сопротивление R_k мало, поэтому и мощность P_k тоже мала. Переход транзистора из состояния отсечки в состояние насыщения и обратно происходит практически мгновенно под действием управляющего напряжения, подаваемого на базу. За это время транзистор не успевает нагреться.

7.8. Полевые транзисторы

Полевыми транзисторами называются полупроводниковые приборы, в которых регулирование тока осуществляется изменением проводимости проводящего канала с помощью электрического поля, перпендикулярного направлению тока. Протекание тока в канале обусловлено только одним типом зарядов.

Электроды, подключенные к каналу, называются *стоком* и *истоком*, а управляющий электрод – *затвором*. Управляющее напряжение, создающее электрическое поле в канале, приложено между затвором и истоком.

Различают полевые транзисторы двух типов: с затвором в виде *p-n* перехода и с изолированным затвором.

Устройство транзистора с затвором в виде *p-n* перехода представлено на рис. 134.

Основу полевого транзистора составляет полупроводниковая пластина *p*-типа, к торцам которой приложено напряжение U_c , создающее ток I_c , протекающий через сопротивление нагрузки R_n .

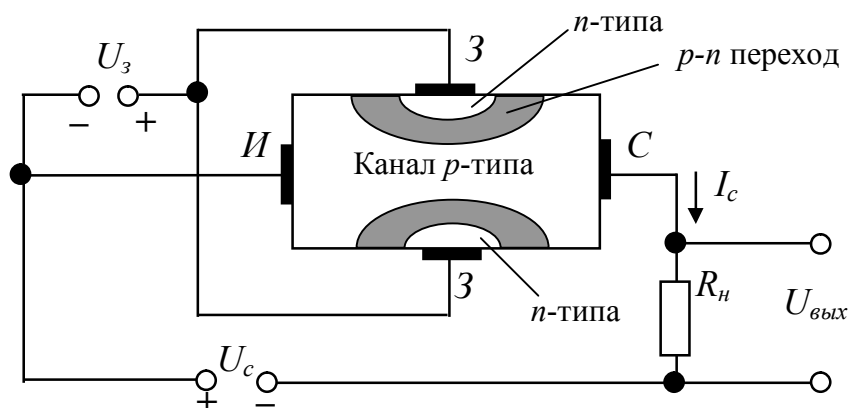


Рис. 134. Схематическое изображение полевого транзистора с *p-n* переходами

В полупроводниковой пластине этот ток создается движением основных носителей заряда. Торец пластины, от которого движутся

носители заряда, называется *истоком*. Торцы, к которому движутся носители заряда, называется *стоком*. В две противоположные боковые поверхности основной пластины вплавлены пластинки *n*-типа. На границе раздела возникают *p-n* переходы, к которым в непроводящем направлении между истоком и затвором приложено входное напряжение U_3 .

Величина этого напряжения может изменяться при обязательном сохранении указанной на схеме полярности. С увеличением напряжения на затворе области *p-n* переходов увеличиваются, а поперечное сечение канала и его проводимость уменьшаются.

Таким образом, изменением напряжения U_3 на затворе можно изменять ток через сопротивление нагрузки R_n и выходное напряжение $U_{вых}$.

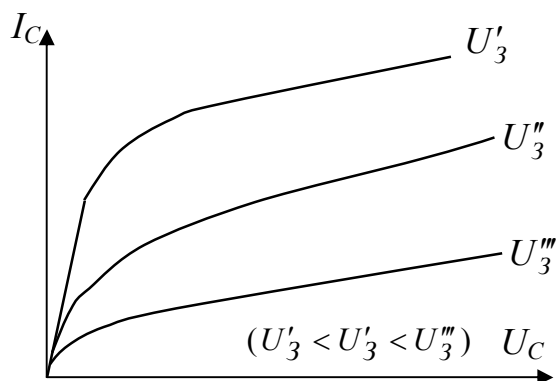


Рис. 135. Семейство характеристик полевого транзистора с затвором в виде *p-n* перехода

$I_C = f(U_C)$ при различных значениях напряжения на затворе U_3 (рис. 135).

Включение полевого транзистора по схеме с общим истоком приведено на рис. 136.

Полевой транзистор может включаться также по схеме с общим стоком и с общим затвором. Однако такие схемы включения применяются редко.

Перед биполярными полевые транзисторы имеют существенные преимущества, к которым относятся большое входное сопротивление, малый уровень собственных шумов, незначительное влияние температуры на усилительные свойства. Ток затвора полевого транзистора очень мал и составляет $I_3 = 10^{-8} - 10^{-12}$ А.

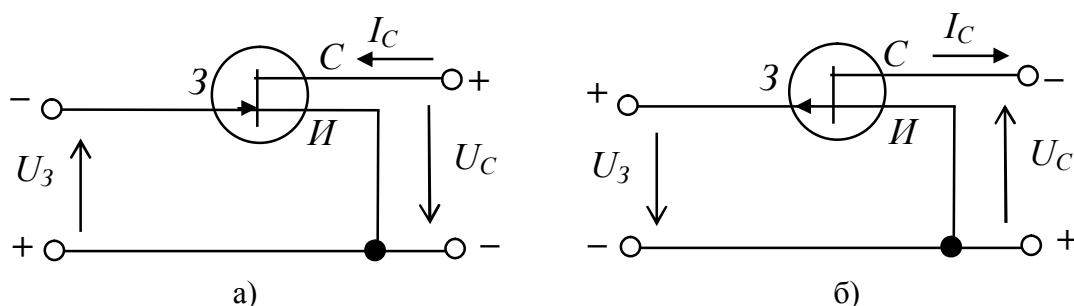


Рис. 136. Схемы включения с общим истоком и условные обозначения полевых транзисторов с управляющим *p-n* переходом:
а — с каналом *n*-типа; б — с каналом *p*-типа

Полевые транзисторы выпускаются также с изолированным затвором. В отличие от транзистора с затвором в виде *p-n* перехода в транзисторах с

изолированным затвором между каналом и затвором внесен изолирующий слой. У транзисторов с изолированным затвором, которые называют транзисторами МДП-типа (металл-диэлектрик-полупроводник), ток затвора уменьшен до величины $I_3=10^{-13}-10^{-16}$ А.

Контрольные вопросы по электронике

1. Какой материал называется полупроводником *n*-типа?
 - 1) тот, в котором основные носители зарядов – электроны;
 - 2) тот, в котором основные носители зарядов – дырки;
 - 3) тот, в котором присутствуют электронно-дырочные пары.

2. Какой материал называется полупроводником *p*-типа?
 - 1) тот, в котором основные носители зарядов – электроны;
 - 2) тот, в котором присутствуют электронно-дырочные пары;
 - 3) тот, в котором основные носители зарядов – дырки.

3. Что называется *p-n* переходом?
 - 1) контакт двух одинаковых полупроводников с дырочной проводимостью;
 - 2) контакт двух полупроводников с разными типами проводимостей;
 - 3) контакт двух одинаковых полупроводников с электронной проводимостью.

4. Назовите наиболее важное свойство *p-n* перехода, которое позволило широко использовать полупроводники.
 - 1) его электрическое сопротивление минимально;
 - 2) его электрическое сопротивление максимально;
 - 3) его электрическое сопротивление не зависит от параметров цепи;
 - 4) его электрическое сопротивление зависит от полярности напряжения, приложенного к электродам в области *p-n* перехода.

5. Что представляет собой прямой ток в *p-n* переходе?
 - 1) ток, обусловленный движением только электронов;
 - 2) ток, обусловленный движением основных носителей зарядов;
 - 3) ток, обусловленный движением неосновных носителей зарядов.

6. Что представляет собой обратный ток в *p-n* переходе?
 - 1) ток, обусловленный движением дырок;
 - 2) ток, обусловленный движением основных носителей зарядов;

3) ток, обусловленный движением неосновных носителей зарядов.

7. Что представляет собой полупроводниковый диод?

1) полупроводник с одним p - n переходом, который хорошо проводит ток только в одном направлении;

2) полупроводник с одним p - n переходом, который хорошо проводит ток во всех направлениях;

3) полупроводник с одним p - n переходом, который ограничивает электрический ток.

8. Что такое электрический пробой p - n перехода?

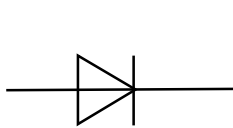
1) механическое разрушение p - n перехода;

2) необратимое разрушение p - n перехода при его перегреве;

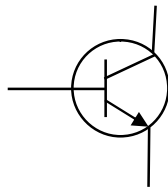
3) резкое (лавинное) увеличение обратного тока при неизменном обратном напряжении;

4) резкое (лавинное) увеличение прямого тока при неизменном прямом напряжении.

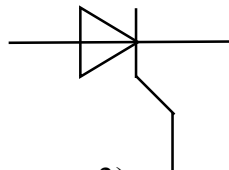
9. Как условно на электрической схеме обозначается диод?



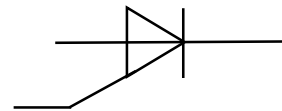
1)



2)

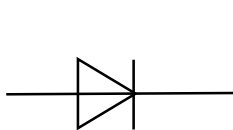


3)

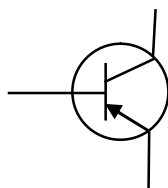


4)

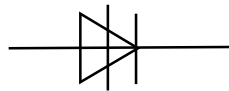
10. Как условно на электрической схеме обозначается управляемый тиристор?



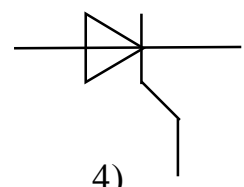
1)



2)



3)



4)

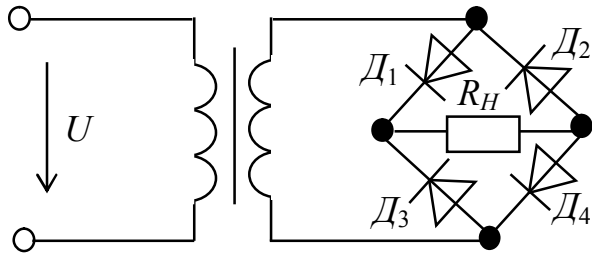
11. Что представляет собой полупроводниковый тиристор?

1) полупроводниковый прибор с двумя p - n переходами, позволяющий усиливать электрический сигнал;

2) полупроводниковый прибор с одним p - n переходом, который хорошо проводит ток в прямом направлении;

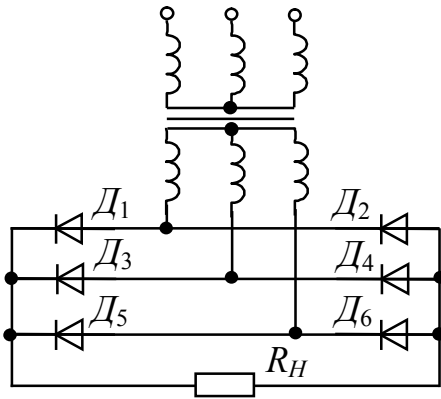
3) полупроводниковый прибор с тремя $p-n$ переходами, используемый для электронного переключения.

12. Какой выпрямитель изображен на схеме?



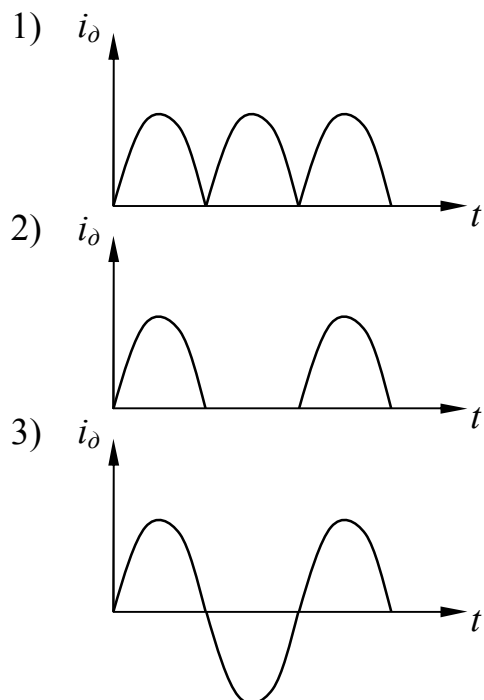
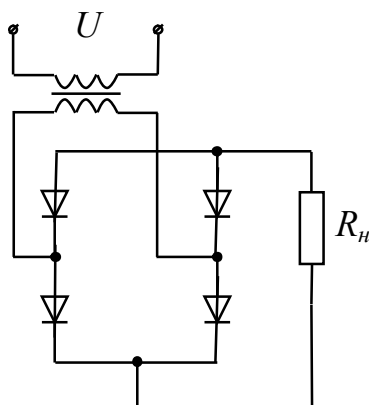
- 1) однополупериодный;
- 2) двухполупериодный с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора;
- 3) двухполупериодный мостовой;
- 4) трехфазный мостовой.

13. Какой выпрямитель изображен на схеме?

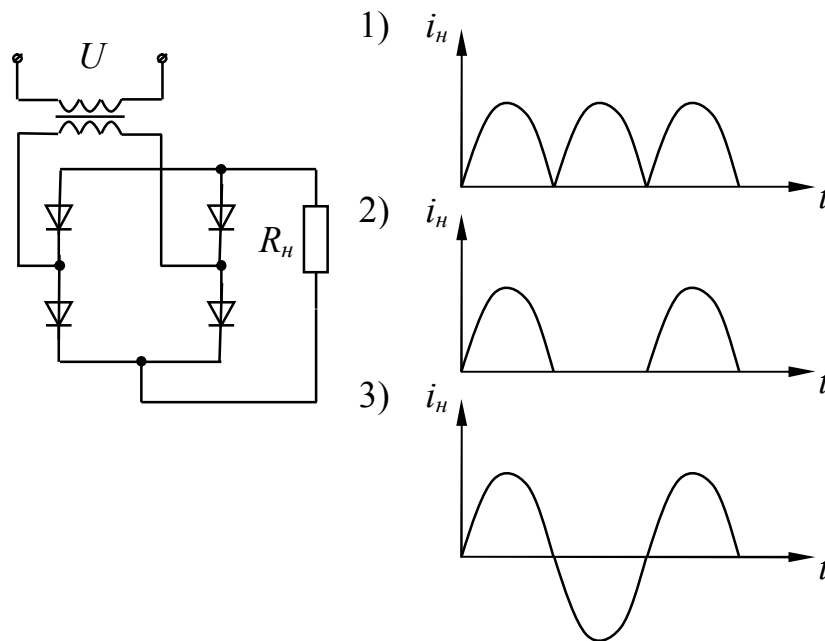


- 1) двухполупериодный с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора;
- 2) двухполупериодный мостовой;
- 3) трехфазный мостовой.

14. Какова форма тока, протекающего через каждый диод?



15. Какова форма тока, протекающего через сопротивление нагрузки?



16. Существует ли связь между входными и выходными характеристиками транзисторов и вольт-амперной характеристикой диода?

- 1) не существует;
- 2) существует. Входная характеристика транзистора подобна прямой ветви вольт-амперной характеристики диода;
- 3) существует. Выходная характеристика транзистора подобна прямой ветви вольт-амперной характеристики диода.

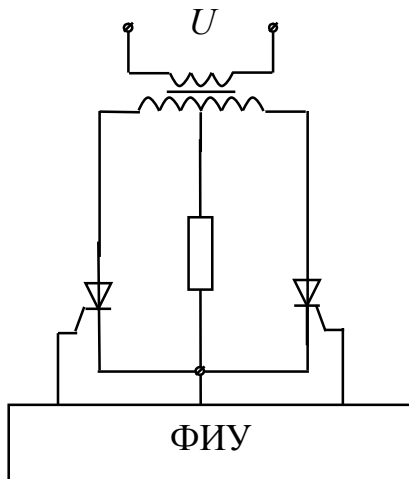
17. В чем отличие управляемых выпрямителей от неуправляемых?

- 1) управляемые выпрямители совмещают выпрямление переменного напряжения с управлением его величиной;
- 2) управляемые выпрямители совмещают выпрямление переменного напряжения с усилением;
- 3) управляемые выпрямители совмещают выпрямление переменного напряжения с отключением цепи при резком его увеличении.

18. Запирается ли тиристор после снятия управляющего импульса?

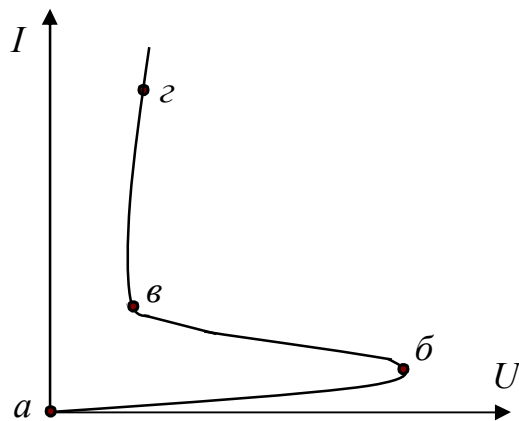
- 1) да;
- 2) нет, если сохраняется полярность напряжения, приложенного между анодом и катодом;
- 3) это зависит от длительности управляющего импульса.

19. Какой выпрямитель изображен на схеме?



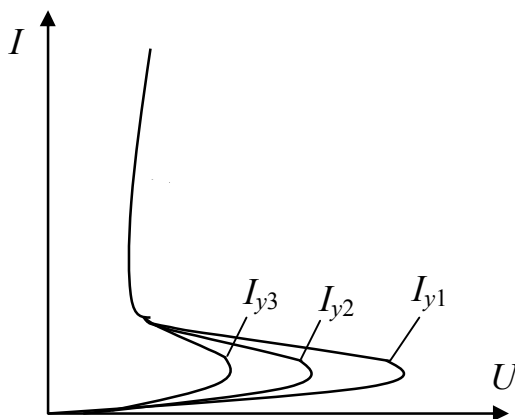
- 1) двухполупериодный мостовой неуправляемый;
- 2) однофазный управляемый выпрямитель с нулевым выводом трансформатора;
- 3) двухполупериодный неуправляемый выпрямитель с нулевым выводом трансформатора.

20. Каким отрезком на графике вольт-амперной характеристики тиристора определяется величина напряжения прямого пробоя?



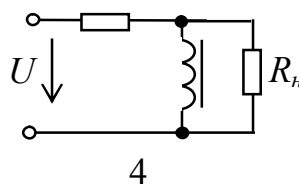
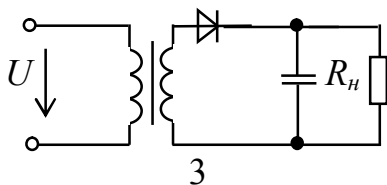
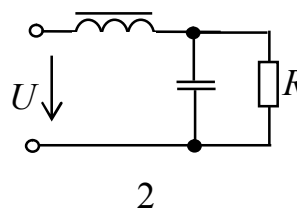
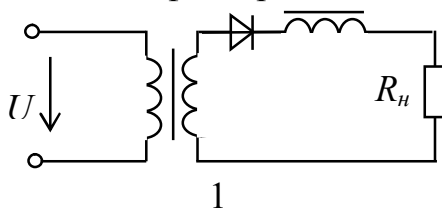
- 1) бв;
- 2) гв;
- 3) аг;
- 4) аб.

21. В каких соотношениях находятся величины токов цепи управления на приведенных графиках вольт-амперных характеристик управляемого тиристора?



- 1) $I_{y1} > I_{y2} > I_{y3}$;
- 2) $I_{y1} = I_{y2} = I_{y3}$;
- 3) $I_{y1} < I_{y2} < I_{y3}$.

22. Укажите электрические схемы выпрямителей с соответствующими сглаживающими фильтрами.



- 1) 1 – схема с емкостным фильтром, 2 – схема с индуктивным фильтром;
- 2) 3 – схема с емкостным фильтром, 1 – схема с индуктивным фильтром;
- 3) 2 – схема с емкостным фильтром, 3 – схема с индуктивным фильтром;
- 4) 4 – схема с индуктивным фильтром, 2 – схема с емкостным фильтром.

23. Как повлияет увеличение частоты f питающего напряжения выпрямителя на работу емкостного сглаживающего фильтра?

- 1) сглаживание улучшится;
- 2) сглаживание ухудшится;
- 3) сглаживание не изменится.

24. Для каких целей предназначен сглаживающий фильтр?

- 1) для выпрямления переменного тока;
- 2) для усиления электрических сигналов;
- 3) для включения и отключения электронных устройств;
- 4) для уменьшения пульсаций выпрямленного тока.

25. Назовите отличия между тиристором и симистором.

- 1) тиристор может пропускать ток только в одном направлении, а симистор – в обоих направлениях;
- 2) симистор может проводить ток гораздо большей силы, чем тиристор.

26. Может ли симисторный регулятор регулировать мощность, если на его вход подать постоянное напряжение?

- 1) может, но при этом возрастут потери мощности на симисторе;

2) не может, так как с поступлением первого управляющего импульса симистор откроется и будет оставаться открытым до тех пор, пока не будет снято питающее напряжение.

27. В чем преимущество симисторного регулятора переменного тока перед реостатным?

- 1) практическое отсутствие потерь мощности;
- 2) простота схемы управления регулятором.

28. Что представляет собой биполярный транзистор?

- 1) полупроводник, имеющий один $p-n$ переход, предназначенный для выпрямления переменного напряжения;
- 2) полупроводник, имеющий два $p-n$ перехода, предназначенный для усиления сигналов;
- 3) полупроводник, имеющий три $p-n$ перехода, предназначенный для управления величиной напряжения.

29. Что называется базой биполярного транзистора?

- 1) наружный слой, являющийся носителем зарядов, который создает ток;
- 2) наружный слой, принимающий заряды;
- 3) средний слой.

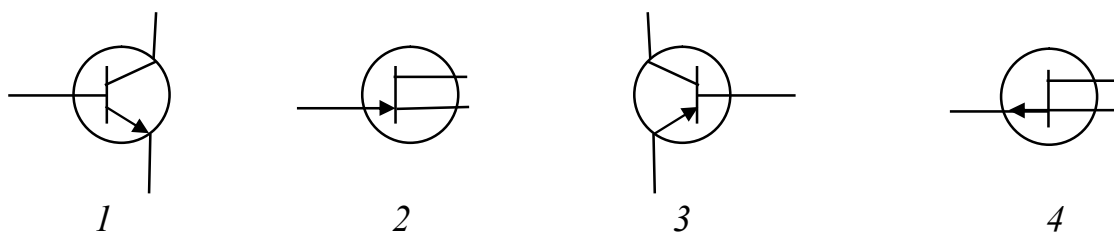
30. Что называется эмиттером биполярного транзистора?

- 1) наружный слой, являющийся носителем зарядов, который создает ток;
- 2) наружный слой, принимающий заряды;
- 3) средний слой.

31. Что называется коллектором биполярного транзистора?

- 1) наружный слой, являющийся носителем зарядов, который создает ток;
- 2) наружный слой, принимающий заряды;
- 3) средний слой.

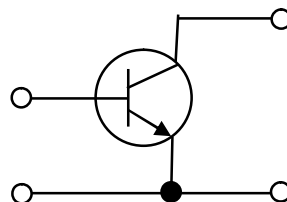
32. Как на электрической схеме условно изображается биполярный транзистор?



- 1) 1 – транзистор типа $n-p-n$, 3 – транзистор типа $p-n-p$;
- 2) 1 – транзистор типа $p-n-p$, 2 – транзистор типа $n-p-n$;
- 3) 3 – транзистор типа $n-p-n$, 1 – транзистор типа $p-n-p$;
- 4) 4 – транзистор типа $n-p-n$, 2 – транзистор типа $p-n-p$.

33. По какой схеме включен транзистор?

- 1) с ОБ;
- 2) с ОК;
- 3) с ОЭ.

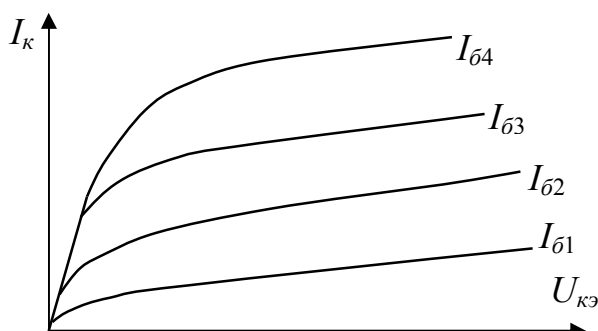


34. Какое напряжение должно быть в цепи «коллектор–эмиттер» ($U_{кэ}$) и в цепи «база–эмиттер» ($U_{бэ}$) при работе транзистора в усилительной схеме?

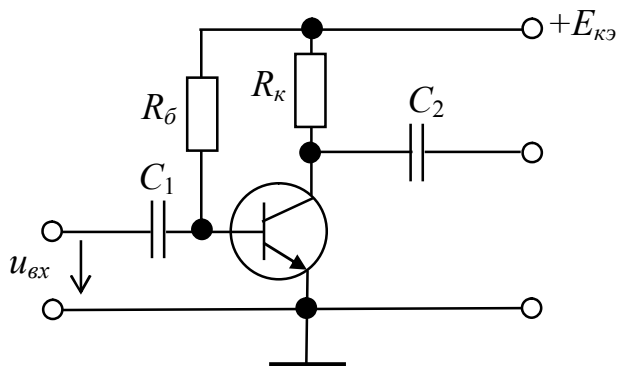
- 1) $U_{кэ}$ – прямое, $U_{бэ}$ – обратное;
- 2) $U_{кэ}$ – обратное, $U_{бэ}$ – прямое;
- 3) не имеет значения.

35. Какое соотношение между токами базы на приведенных графиках коллекторных статических характеристик транзистора?

- 1) $I_{б1} > I_{б2} > I_{б3} > I_{б4}$;
- 2) $I_{б1} = I_{б2} = I_{б3} = I_{б4}$;
- 3) $I_{б1} < I_{б2} < I_{б3} < I_{б4}$.



36. Для чего в цепи «коллектор–эмиттер» транзисторного усилительного каскада служит сопротивление R_k ?



- 1) для получения нагрузочного режима;
- 2) для увеличения выходного сопротивления усилительного каскада;
- 3) для увеличения сопротивления в цепи «коллектор–эмиттер».

37. Чем характеризуется состояние отсечки при работе транзистора в ключевом режиме?

- 1) малым током коллектора;
- 2) малым сопротивлением коллекторного перехода.

38. Чем характеризуется состояние насыщения при работе транзистора в ключевом режиме?

- 1) малым током коллектора;
- 2) малым сопротивлением коллекторного перехода.

8. ВОПРОСЫ ИТОГОВОГО КОНТРОЛЯ

8.1. Цепи постоянного тока

1. Изобразите схему электрической цепи, состоящей из источника питания, потребителя и соединительных проводов между ними. Обозначьте элементы схемы и напишите формулу закона Ома для всей цепи.

2. Напишите формулу для закона Ома для участка цепи.

3. В каких единицах измеряются ЭДС, напряжение и ток?

4. Какое соотношение между ЭДС и напряжением на зажимах источника питания?

5. Выведите формулу эквивалентного сопротивления участка цепи, состоящего из n последовательно соединенных сопротивлений.

6. Выведите формулу эквивалентного сопротивления участка цепи, состоящего из n параллельно соединенных сопротивлений.

7. Два сопротивления R_1 и R_2 соединены параллельно. Напишите формулу эквивалентного сопротивления.

8. Напишите формулу эквивалентного сопротивления участка цепи, состоящего из трех сопротивлений R_1 , R_2 и R_3 , соединенных параллельно.

9. Изобразите схему, состоящую из источника питания с сопротивлением r_0 и двух приемников энергии с сопротивлениями R_1 и R_2 , соединенных параллельно. Напишите формулу эквивалентного сопротивления всей цепи.

10. Изобразите схему с несколькими источниками питания и несколькими резисторами. Напишите формулу баланса мощностей для данной цепи.

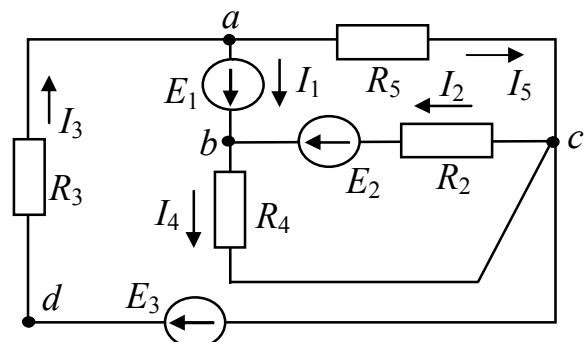
11. Сформулируйте первый и второй законы Кирхгофа. Для примера изобразите электрические схемы и поясните на них сущность законов.

12. Объясните метод контурных токов.

13. Почему при расчете цепи, содержащей n узлов, можно по первому закону Кирхгофа составить только $n-1$ независимых уравнений?

14. В цепи несколько источников питания. Некоторые из них работают в режиме генератора, а остальные в режиме нагрузки. По какому признаку определяется режим работы тех и других источников питания?

15. Пользуясь законами Кирхгофа или методом контурных токов, определить токи в ветвях цепи, если $E_1=24$ В; $E_2=96$ В; $E_3=48$ В; $R_2=16$ Ом; $R_3=8$ Ом; $R_4=16$ Ом; $R_5=8$ Ом. Внутреннее сопротивление источников питания равно нулю. Найти мощность источников и



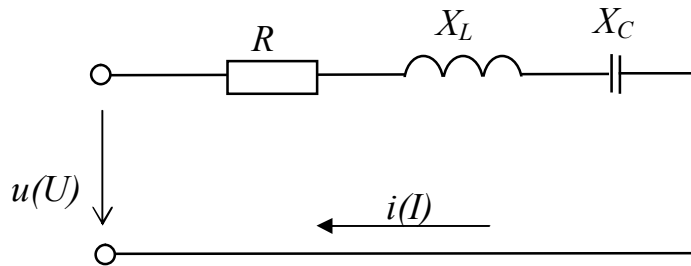
Ответ. $I_1=0$; $I_2=I_3=I_4=I_5=3$ А. Мощности источников и приемников равны по 432 Вт.

8.2. Однофазные цепи переменного тока

1. Сформулируйте определение понятия действующего и амплитудного значения синусоидального переменного тока.
2. Изобразите временную диаграмму переменного синусоидального тока. Укажите мгновенные и амплитудные значения тока. Запишите формулы для определения мгновенных значений тока, напряжения и ЭДС.
3. Напишите выражение, связывающее действующее и амплитудное значения синусоидального переменного тока.
4. Дайте характеристики основным видам сопротивлений, применяемых в цепях синусоидального переменного тока, покажите их графическое изображение на электрических схемах.
5. Почему включение конденсатора в цепь постоянного тока равносильно разрыву цепи, а включение конденсатора в цепь переменного тока к разрыву цепи не приводит (через емкостный элемент протекает ток)?
6. Напишите выражение мгновенных значений напряжения и тока для цепи переменного тока с активным сопротивлением, изобразите временную и векторную диаграммы напряжения и тока.
7. Напишите выражение мгновенных значений напряжения и тока для цепи переменного тока с идеальным индуктивным элементом, изобразите временную и векторную диаграммы напряжения и тока.
8. Напишите выражение мгновенных значений напряжения и тока для цепи переменного тока с емкостным элементом, изобразите временную и векторную диаграммы напряжения и тока.
9. Изобразите электрическую схему и постройте временную и векторную диаграммы для реальной индуктивной катушки. Напишите выражение полного сопротивления для реальной индуктивной катушки.
10. Изобразите треугольники напряжений, сопротивлений и мощностей и для каждого треугольника напишите уравнения для сторон этих треугольников.
11. В какой цепи и при каком условии возникает резонанс напряжений? Изобразите электрическую схему и векторную диаграмму.
12. В какой цепи и при каком условии возникает резонанс токов? Изобразите электрическую схему и векторную диаграмму.
13. Что такое активная, реактивная и полная мощности и в каких единицах они измеряются?

14. В сеть с напряжением $U=220$ В, частотой 50 Гц включены последовательно катушка с активным сопротивлением $R=10$ Ом и индуктивным сопротивлением $X_L=30$ Ом, а также конденсатор с емкостью 200 мкФ .

Определить ток, напряжения на зажимах катушки и конденсатора. Вычислить активную мощность и реактивные мощности катушки,

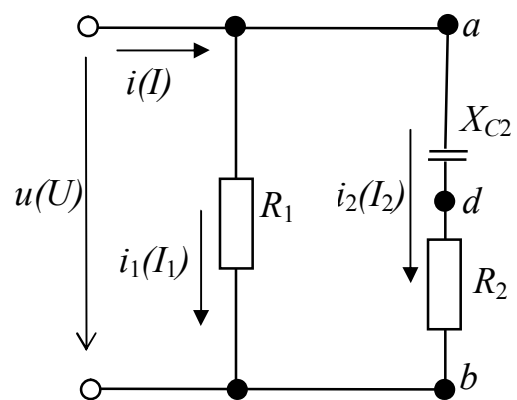


Ответ. $I \approx 10,2$ А; $U_R \approx 322$ В; $U_C = 112$ В; $P = 1040$ Вт; $Q_L = 3120$ ВАр; $Q_C = 1144$ ВАр; $Q = 1976$ ВАр.

15. Найти токи в ветвях и в неразветвленном участке приведенной схемы при условии, что $U=127$ В; $f=50$ Гц; $R_1=10$ Ом; $R_2=8$ Ом; $X_{L2}=6$ Ом.

Определить напряжение на участках ad и bd , а также полную проводимость и полное сопротивление всей цепи.

Ответ. $I_1=12,7$ А; $I_2=12,7$ А; $I \approx 24$ А; $Y=0,19$ См; $Z=5,27$ Ом; $U_{ad}=76$ В; $U_{bd}=102$ В.



8.3. Трехфазные цепи переменного тока

1. Дайте определение трехфазной системы синусоидального тока, назовите ее преимущества перед однофазной.

2. Напишите выражение для мгновенных значений ЭДС, получаемых на выходе трехфазного генератора переменного тока (для фазы A начальную фазу ЭДС принять равной нулю).

3. В трехфазную линию включены три приемника по схеме «звезда» с нейтральным проводом. Изобразите схему с измерительными приборами для измерения линейных и фазных токов и напряжений.

4. В трехфазную линию включены три приемника по схеме «треугольник». Изобразите схему с измерительными приборами для измерения линейных и фазных токов и напряжений.

5. Дайте определение линейных и фазных напряжений и токов.

6. Назовите условия симметричной нагрузки в трехфазных цепях.

7. Напишите соотношения между фазными и линейными токами и напряжениями для схемы «звезда» в случае симметричной нагрузки.

8. Напишите соотношения между фазными и линейными токами и напряжениями для схемы «треугольник» в случае симметричной нагрузки.

9. Объясните назначение нейтрального провода в схеме соединения «звезда».

10. Изобразите векторную диаграмму напряжений и покажите на ней векторы токов для трехфазной цепи при соединении нагрузки по схеме «звезда», если в фазу A включена активная нагрузка с сопротивлением R , в фазу B – индуктивная нагрузка с сопротивлением X_L , а в фазу C – емкостная нагрузка с сопротивлением X_C .

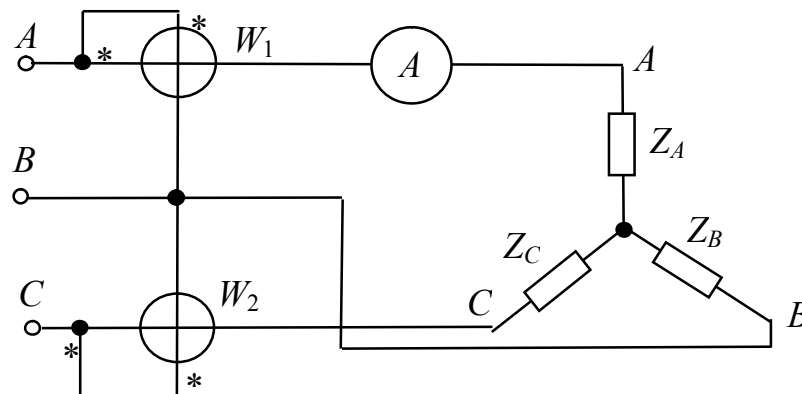
11. Изобразите топографическую векторную диаграмму напряжений и покажите на ней векторы токов для трехфазной нагрузки, соединенной по схеме «треугольник», если в фазу A включено активное сопротивление R_A , в фазы B и C – соответственно индуктивные сопротивления X_B и X_C .

12. В схеме «звезда» при симметричной нагрузке без нейтрального провода произошел обрыв одного из линейных проводов. Определить токи в двух других линейных проводах, если до обрыва ток линейного провода был равен 8 А.

13. Напишите выражения для активной, реактивной и полной мощностей трехфазной системы в случае симметричной и несимметричной нагрузки.

14. Изобразите схему компенсации реактивной мощности для повышения коэффициента мощности трехфазной системы и объясните процесс компенсации с использованием векторной диаграммы.

15. Определите вид нагрузки и сопротивление фаз симметричного приемника электрической энергии, соединенного по схеме «звезда», если линейное напряжение $U_{\text{л}}=380$ В; ток в линии $I_{\text{л}}=4,4$ А; показания ваттметров W_1 и W_2 составляют соответственно $P_1=1665$ Вт; $P_2=707$ Вт.



Ответ. $R=41$ Ом; $X_L=28,7$ Ом; $\varphi=35^\circ$; активно-индуктивная нагрузка.

8.4. Асинхронные двигатели

1. Назовите основные достоинства и недостатки трехфазного асинхронного двигателя.
2. Объясните устройство трехфазного асинхронного двигателя.
3. Как происходит возбуждение вращающегося магнитного поля трехфазного асинхронного двигателя?
4. Объясните принцип действия трехфазного асинхронного двигателя.
5. Напишите формулы для ЭДС статора и ротора асинхронного двигателя.
6. Что называется скольжением ротора трехфазного асинхронного двигателя? Чему равно скольжение в момент пуска двигателя, в режиме холостого хода и в номинальном режиме работы?
7. Напишите уравнения для ЭДС, наводимой в роторе, и для тока ротора при неподвижном и вращающемся роторе.
8. Как изменить направление вращения ротора трехфазного асинхронного двигателя?
9. Напишите формулу для определения вращающего момента трехфазного асинхронного двигателя в зависимости от тока ротора и магнитного потока.
10. Напишите уравнение механической характеристики трехфазного асинхронного двигателя. Изобразите естественную механическую характеристику.
11. Почему при увеличении скольжения от нуля до критического значения вращающий момент увеличивается, а при дальнейшем увеличении скольжения от критического значения до 1 – уменьшается?
12. Какой участок графика $n=f(M)$ соответствует устойчивой работе двигателя, а какой – неустойчивой?
13. Как влияет величина сопротивления цепи ротора на пусковые свойства двигателя?
14. Перечислите способы регулирования частоты вращения ротора асинхронного двигателя.
15. Как осуществляется изменение числа пар полюсов обмотки статора асинхронного двигателя?
16. Изобразите искусственные механические характеристики трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором при регулировании частоты вращения введением добавочных сопротивлений в цепь ротора.
17. Какие генераторные и тормозные режимы работы асинхронного двигателя существуют? Когда и как они проявляются?

18. Какие потери мощности существуют при работе трехфазного асинхронного двигателя под нагрузкой?

19. От чего зависит величина коэффициента мощности трехфазного асинхронного двигателя?

20. Какие основные недостатки присущи однофазному асинхронному двигателю?

8.5. Машины постоянного тока

1. Перечислите основные достоинства и недостатки машин постоянного тока.

2. В чем сущность обратимости машин постоянного тока?

3. Изобразите схематически устройство машины постоянного тока.

4. Объясните принцип работы машины постоянного тока в режиме генератора и в режиме двигателя.

5. Объясните сущность явления реакции якоря.

6. Напишите формулу для электромагнитного вращающего момента двигателя.

7. Напишите уравнение электрического состояния цепи якоря машины постоянного тока в режиме генератора и в режиме двигателя.

8. Изобразите электрическую схему машины постоянного тока с параллельным возбуждением. Покажите направления токов в цепи якоря и в обмотке возбуждения в режиме двигателя.

9. Изобразите электрическую схему машины постоянного тока с последовательным возбуждением и покажите направления токов и ЭДС в режиме двигателя.

10. В чем особенность работы двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением в отличие от двигателя с параллельным возбуждением?

11. Напишите уравнения механических характеристик двигателей с параллельным и последовательным возбуждением и изобразите эти характеристики.

12. Перечислите способы регулирования частоты вращения двигателей постоянного тока и укажите достоинства и недостатки этих способов.

13. Какие генераторные и тормозные режимы двигателей постоянного тока существуют? Когда и как они проявляются?

14. Для двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением изобразите в одной координатной системе естественную и две искусственных механических характеристики: а) при включении в цепь якоря добавочного сопротивления; б) при включении регулировочного реостата в цепь обмотки возбуждения.

15. Для двигателя с параллельным возбуждением изобразите схему, позволяющую осуществлять реверс двигателя.

8.6. Трансформаторы

1. Изобразите однофазный трансформатор и объясните принцип его работы.

2. Почему на сердечнике трансформатора обмотки высшего и низшего напряжений размещают на общем стержне?

3. Какую обмотку трансформатора называют первичной и какую вторичной?

4. Напишите выражение для действующих значений ЭДС, наводимых в первичной и вторичной обмотках трансформатора.

5. Напишите уравнение намагничивающих сил в трансформаторе.

6. Какой режим работы трансформатора называется режимом холостого хода? Изобразите электрическую схему однофазного трансформатора в режиме холостого хода и объясните принцип его работы в этом режиме.

7. Что называется коэффициентом трансформации трансформатора?

8. В чем состоит явление рассеяния в трансформаторе?

9. Изобразите электрическую схему однофазного трансформатора в режиме работы с нагрузкой. Объясните принцип действия трансформатора в этом режиме.

10. Объясните принцип саморегулирования трансформатором потребляемой мощности.

11. Напишите уравнения электрического состояния первичной и вторичной обмоток трансформатора при работе в нагрузочном режиме и объясните смысл каждого члена этих уравнений.

12. Почему в режиме холостого хода потери мощности в трансформаторе очень малы?

13. Как осуществляется трансформирование в трехфазной цепи?

14. В чем аналогия между асинхронным двигателем и трансформатором?

8.7. Электроника

1. В чем сущность электронной электропроводности в полупроводниках *n*-типа?

2. В чем сущность дырочной электропроводности в полупроводниках *p*-типа?

3. Объясните образование p - n перехода и расскажите о его свойствах.
4. Объясните устройство и принцип работы полупроводникового диода.
5. Изобразите схему однополупериодного выпрямителя и объясните принцип его работы. Дайте определение коэффициента пульсаций. Чему равен этот коэффициент для однополупериодного выпрямителя?
6. Изобразите схему двухполупериодного (однофазного мостового) выпрямителя и объясните принцип его работы. В чем преимущество этой схемы перед однополупериодной?
7. Изобразите схему трехфазного мостового выпрямителя и объясните принцип его работы.
8. Объясните назначение сглаживающих фильтров и назовите их основные типы.
9. Изобразите схему включения и объясните принцип работы емкостного сглаживающего фильтра.
10. Изобразите схему включения и объясните принцип работы индуктивного сглаживающего фильтра.
11. Изобразите схему Π -образного LC -фильтра и объясните принцип его работы.
12. В чем отличие неуправляемых выпрямителей от управляемых?
13. Изобразите схему и объясните принцип действия управляемого тиристора.
14. Какую функцию выполняет цепь управления тиристора?
15. Изобразите схему и объясните принцип действия однополупериодного выпрямителя на тиристоре с использованием временной диаграммы.
16. Объясните устройство и принцип работы биполярного транзистора.
17. Изобразите включение биполярных транзисторов типа n - p - n и p - n - p по схеме с общим эмиттером.
18. Объясните устройство и принцип действия полевого транзистора.
19. Изобразите включение полевых транзисторов с n и p каналами по схеме с общим истоком.
20. Изобразите принципиальную электрическую схему усилительного каскада на биполярном транзисторе с общим эмиттером и объясните принцип работы.
21. Для чего на семействе статических коллекторных (выходных) характеристик биполярного транзистора строится нагрузочная прямая?
22. На семействе статических коллекторных (выходных) характеристик биполярного транзистора постройте нагрузочную прямую и запишите уравнение нагрузочной характеристики.

Библиографический список

1. *Данилов И.Л., Иванов П.М.* Общая электротехника с основами электроники.–М.: Высшая школа. – 2000. – 752 с.
2. *Евдокимов Ф. Е.* Теоретические основы электротехники.–М.: Высшая школа, 1999. – 496 с.
3. *Касаткин А.С., Немцов М.В.* Электротехника.–М.: Высшая школа, 2003. – 542 с.
4. *Лоторейчук Е.А.* Теоретические основы электротехники.–М.: Высшая школа. – 2000. – 224 с.
5. *Третьяк Г.М., Тихонов Ю.Б.* Электрические цепи переменного тока: Учебное пособие. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2004. – 84 с.