

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

**ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ.
ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением
по аграрному техническому образованию
в качестве учебно-методического пособия для студентов
учреждений высшего образования по специальностям:
1-74 06 01 Техническое обеспечение процессов сельскохозяйственного
производства; 1-74 06 02 Техническое обеспечение процессов
хранения и переработки сельскохозяйственной продукции;
1-74 06 03 Ремонтно-обслуживающее производство
в сельском хозяйстве; 1-74 06 06 Материально-техническое
обеспечение агропромышленного комплекса; 1-74 06 07 Управление
охраной труда в сельском хозяйстве; 1-36 12 01 Проектирование
и производство сельскохозяйственной техники*

Минск
БГАТУ
2020

УДК 621.3(07)
ББК 31.2я7
О-75

Составители:

кандидат технических наук,
доцент кафедры электротехники *А. П. Мириленко*,
старший преподаватель *В. А. Курочкин*,
старший преподаватель *Е. В. Зайцев*,
старший преподаватель *И. И. Скочек*

Рецензенты:

кафедра технического обеспечения
сельскохозяйственного производства и агрономии
УО «Барановичский государственный университет»
(кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой *А. К. Гавриленя*);
заведующий лабораторией научного обеспечения испытаний
и информационно-технических технологий РУП «НПЦ НАН Беларуси
по механизации сельского хозяйства» *В. К. Клыбик*

О-75 **Основы** электротехники и электроники. Практикум : учебно-методическое пособие / сост.: А. П. Мириленко [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2020. – 84 с.
ISBN 978-985-25-0059-3.

Содержит материалы к практическим занятиям, направленным на освоение принципов расчета электрических цепей и машин, электроизмерительных приборов и подбора элементов электроники.

Для студентов учреждений высшего образования.

УДК 621.3(07)
ББК 31.2я7

ISBN 978-985-25-0059-3

© БГАТУ, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Практическое занятие № 1 Основные метрологические характеристики средств измерений. Расширение пределов измерений магнитоэлектрических приборов	5
Практическое занятие № 2 Основы расчета простых электрических цепей постоянного тока. Цепи с последовательным, параллельным и смешанным соединением элементов.....	13
Практическое занятие № 3 Расчет сложных электрических цепей постоянного тока. Методы непосредственного применения уравнений Кирхгофа и контурных токов.....	21
Практическое занятие № 4 Формы представления величин переменного синусоидального тока.....	28
Практическое занятие № 5 Расчет разветвленных цепей переменного синусоидального тока в комплексных числах.....	34
Практическое занятие № 6 Особенности расчета трехфазных цепей переменного синусоидального тока.....	40
Практическое занятие № 7 Расчет параметров трансформаторов.....	48
Практическое занятие № 8 Расчет параметров трехфазного асинхронного двигателя	53
Практическое занятие № 9 Основы выбора полупроводниковых элементов по требованиям электрической цепи	64
Практическое занятие № 10 Логические элементы и комбинационные устройства. Основы булевой алгебры.....	69
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	78
ПРИЛОЖЕНИЕ	80

ВВЕДЕНИЕ

Издание является пособием к практическим занятиям, проводимым в соответствии с программой учебной дисциплины «Основы электротехники и электроники» специальностей 1-74 06 01 «Техническое обеспечение процессов сельскохозяйственного производства», 1-74 06 02 «Техническое обеспечение процессов хранения и переработки сельскохозяйственной продукции», 1-74 06 03 «Ремонтно-обслуживающее производство в сельском хозяйстве», 1-74 06 06 «Материально-техническое обеспечение агропромышленного комплекса», 1-74 06 07 «Управление охраной труда в сельском хозяйстве» и 1-36 12 01 «Проектирование и производство сельскохозяйственной техники».

Методические указания включают материалы для десяти практических занятий по темам «Электроизмерительные приборы», «Теория электрических цепей», «Электрические машины и трансформаторы» и «Основы электроники». Для каждого практического занятия указывается его цель, даются методические указания по подготовке к нему, теоретические сведения, приводятся примеры решения задач, а также многовариантные задачи для самостоятельного решения и контроля усвоения пройденного материала.

Теория, изложенная в пособии, может служить основой для самоподготовки студентов. Для более глубокого освоения дисциплины следует ознакомиться с предложенной рекомендуемой литературой.

Практическое занятие № 1

ОСНОВНЫЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ. РАСШИРЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Рабочее место: аудитория.

Время проведения занятия: 90 мин.

Цель занятия: ознакомиться с расчетными методиками определения основных метрологических характеристик измерительных приборов; освоить способы расширения пределов измерений приборов магнитоэлектрической измерительной системы.

Общие сведения

Основные метрологические характеристики

Функция преобразования – функциональная зависимость между выходной величиной Y и входной X в установившемся (статическом) режиме работы средства измерений:

$$Y = f(X).$$

Функция преобразования задается аналитически (уравнением), таблично или графически. Она может быть линейной или нелинейной.

Чувствительность – свойство средства измерений, определяемое отношением изменения выходного сигнала этого средства измерений к вызывающему его изменению измеряемой величины:

$$S = \lim_{dX \rightarrow 0} \frac{dY}{dX} = \frac{dY}{dX}.$$

Порог чувствительности – характеристика средства измерений в виде наименьшего значения изменения физической величины, начиная с которого может осуществляться ее измерение данным средством.

Диапазон измерений – область значений физической величины, в пределах которой нормированы допускаемые пределы погрешности средства измерений.

Диапазон показаний – область значений шкалы прибора, ограниченная начальным и конечным значениями шкалы.

Цена деления шкалы – разность значений величины, соответствующих двум соседним отметкам шкалы средства измерений.

Вариация показаний – разность показаний измерительного прибора в одной и той же точке диапазона измерений при плавном подходе к этой точке со стороны возрастающих и убывающих значений измеряемой величины:

$$V = X_B - X_V;$$

$$V = \frac{X_B - X_V}{X_N} 100 \%.$$

При эксплуатации измерительных приборов точность их измерений может изменяться из-за нестабильности свойств отдельных деталей, износа или повреждения некоторых частей прибора. Вследствие этого могут возникнуть погрешности, не соответствующие классу точности прибора, что означает невозможность его использования (негодность). Для определения годности средств измерений проводится их поверка.

Поверка – установление органом государственной метрологической службы (или другим официально уполномоченным органом, организацией) пригодности средств измерений к применению на основании экспериментально определяемых метрологических характеристик и подтверждения их соответствия установленным обязательным требованиям.

Поверка проводится в обязательном порядке при выпуске прибора из производства, после ремонтов и регулировок приборов, а также периодически. Сроки периодических поверок измерительных приборов регламентируются органами Госстандарта.

Электроизмерительные приборы классов точности 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0 поверяются по методу сличения их показаний с показаниями рабочих эталонов. Такой метод поверки требует выполнения следующих метрологических условий:

1. Допустимая абсолютная погрешность рабочего эталона должна быть не менее чем в 4 раза меньше допустимой абсолютной погрешности поверяемого прибора или в 2,5 раза меньше при внесении поправок в показания рабочего эталона.

2. Диапазоны частот и измерений рабочих эталонов должны включать соответствующие диапазоны поверяемого прибора.

3. Указатели (стрелки) приборов устанавливаются корректором на нулевую отметку шкалы при отключенных цепях тока и напряжения.

4. Проверка приборов осуществляется для всех числовых отметок шкалы при возрастании и убывании измеряемой величины.

Для правильного выбора рабочего эталона необходимо определить допустимые значения абсолютной погрешности обоих приборов. Методика расчета приведена в задаче 1.1.

Примеры решения задач

Задача 1.1. Вольтметр с диапазоном измерений от 0 до 50 В показал значение 25 В. Определить пределы допускаемой абсолютной погрешности этого измерения, если класс точности вольтметра: а) 0,5; б) $\textcircled{0,5}$; в) $^{0,2}/_{0,1}$.

Решение:

а) обозначение класса точности 0,5 означает допустимое значение основной приведенной погрешности, т. е. $g_{\max} = 0,5 \%$. Нормирующее значение $U_N = 50$ В. Из формулы для определения приведенной погрешности $\gamma = \frac{DU}{U_N} 100 \%$ выразим абсолютную погрешность:

$$DU = \frac{\gamma U_N}{100 \%} = \frac{0,5 \times 50}{100 \%} = \pm 0,25 \text{ В};$$

б) класс точности $\textcircled{0,5}$ означает, что нормируется допустимое значение основной относительной погрешности, т. е. $\delta_{\max} = 0,5 \%$. Показания вольтметра примем за действительное значение $U = 25$ В.

Из формулы для определения относительной погрешности $\delta = \frac{DU}{U} 100 \%$ выразим абсолютную погрешность:

$$DU = \frac{\delta U}{100 \%} = \frac{0,5 \times 25}{100 \%} = \pm 0,13 \text{ В};$$

в) если класс точности записан в виде дроби $^{0,2}/_{0,1}$, то предельное значение допускаемой основной относительной погрешности в разных точках диапазона измерений определяется по формуле

$$\delta_{\max} = \pm \frac{\delta U}{U} + d \frac{\delta U_K}{|U|} - 1 \frac{\delta U}{U},$$

где $c = 0,2$;

$d = 0,1$;

$U_K = 50 \text{ В}$ – верхний предел измерения;

$U = 25 \text{ В}$ – измеренное значение.

$$\delta_{\max} = \pm \frac{\delta U}{U} + 0,2 + 0,1 \frac{\delta U_K}{U} - 1 \frac{\delta U}{U} = \pm 0,3 \text{ \%}.$$

Найдем допустимое значение абсолютной погрешности:

$$\Delta U = \frac{\delta U}{100 \text{ \%}} = \frac{0,3 \times 25}{100 \text{ \%}} = \pm 0,8 \text{ В}.$$

При проведении измерений с заданной точностью необходимо правильно подобрать метрологические характеристики средств измерений.

Задача 1.2. Определить класс точности амперметра для измерения тока от 1 до 5 А при условии, что относительная погрешность не превышает 1 %.

Решение

В диапазоне от 1 до 5 А максимальное значение относительной погрешности δ будет в точке 1 А. Найдем для нее пределы допускаемой абсолютной погрешности:

$$\Delta I = \frac{\delta I_{\min}}{100 \text{ \%}} = \frac{1 \text{ А}}{100 \text{ \%}} = \pm 0,01 \text{ А}.$$

Тогда допустимое значение приведенной погрешности

$$\gamma = \frac{\Delta I}{I_N} 100 \text{ \%} = \frac{0,01}{5} 100 \text{ \%} = \pm 0,2 \text{ \%}.$$

Таким образом, класс точности амперметра не ниже 0,2.

Задача 1.3. Определить чувствительность и показания миллиамперметра, если стрелка отклонилась на $\alpha = 37$ делений. Цена деления $C_I = 2 \text{ мА/дел}$.

Решение

Чувствительность S_I и цена деления C_I связаны выражением

$$S_I = \frac{1}{C_I} = \frac{1}{2} = 0,5 \text{ дел./мА.}$$

Показания миллиамперметра: $I = C_I \alpha = 2 \times 37 = 74 \text{ мА.}$

Расширение пределов измерения по току

Пределы измерения по току можно расширить при помощи шунтов, т. е. резисторов определенного сопротивления, подключаемых параллельно катушке измерительного механизма. В этом случае согласно первому закону Кирхгофа общий ток I будет равен сумме токов шунта $I_{\text{ш}}$ и измерительного механизма $I_{\text{им}}$. Схема амперметра с шунтом показана на рис. 1.1.

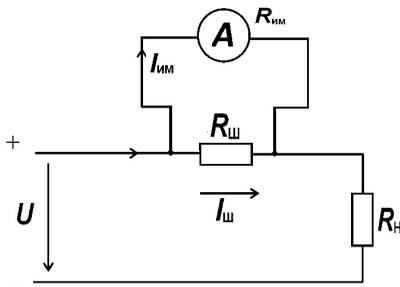


Рис. 1.1. Схема включения измерительного механизма магнитоэлектрической системы с шунтом (амперметр)

Сопротивление шунта определяется из соотношения $I_{\text{ш}} R_{\text{ш}} = I_{\text{им}} R_{\text{им}}$:

$$R_{\text{ш}} = R_{\text{им}} \frac{I_{\text{им}}}{I_{\text{ш}}},$$

где $I_{\text{ш}}$, $I_{\text{им}}$ – токи шунта и измерительного механизма;

$R_{\text{ш}}$, $R_{\text{им}}$ – сопротивления шунта и измерительного механизма.

Так как $I_{\text{ш}} = I - I_{\text{им}}$, получим:

$$R_{\text{ш}} = \frac{R_{\text{им}}}{\frac{I}{I_{\text{им}}} - 1} = \frac{R_{\text{им}}}{n - 1},$$

где $n = \frac{I}{I_{\text{им}}}$ – множитель, показывающий, во сколько раз измеряемый ток больше номинального тока измерительного механизма.

Расширение пределов измерения по напряжению

Так как номинальное напряжение измерительного механизма $U_{\text{им}} = I_{\text{им}}R_{\text{им}}$, для расширения пределов по напряжению используются включаемые последовательно с измерительным механизмом добавочные резисторы $R_{\text{д}}$ (рис. 1.2).

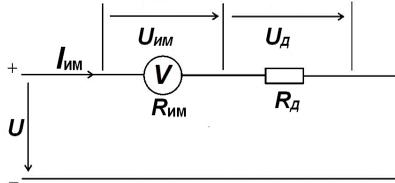


Рис. 1.2. Схема включения измерительного механизма магнитоэлектрической системы с добавочным сопротивлением (вольтметр)

При увеличении предела измерения в m раз величина сопротивления добавочного резистора $R_{\text{д}}$ должна быть такой, чтобы ток, протекающий через рамку измерительного механизма, не превышал номинального значения:

$$I_{\text{им}} = \frac{U_{\text{им}}}{R_{\text{им}}} = \frac{U}{R_{\text{им}} + R_{\text{д}}} = \frac{mU_{\text{им}}}{R_{\text{им}} + R_{\text{д}}},$$

откуда получим формулу для расчета сопротивления добавочного резистора

$$R_{\text{д}} = R_{\text{им}}(m - 1),$$

где $m = \frac{U}{U_{\text{им}}}$.

В том случае, когда известен ток $I_{им}$, удобнее пользоваться формулой

$$R_{д} = \frac{U}{I_{им}} - R_{им}.$$

Добавочные резисторы для уменьшения температурной погрешности изготавливают из материалов с малым температурным коэффициентом сопротивления.

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1.1. Определить допустимые пределы абсолютной погрешности измерений (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Варианты задачи 1.1 для самостоятельного решения

Вариант	Прибор	Диапазон измерений	Класс точности	Вариант	Прибор	Диапазон измерений	Класс точности
1	Вольтметр	0...100 В	0,1	16	Вольтметр	-100...100 В	1,5
2	Амперметр	0...10 А	0,2	17	Амперметр	0...2 А	1,5
3	Ваттметр	0...150 Вт	0,5	18	Ваттметр	0...30 Вт	0,2
4	Фазометр	-90...90°	1,0	19	Фазометр	-90...90°	1,5
5	Омметр	0...200 Ом	1,5	20	Омметр	0...200 кОм	4
6	Вольтметр	0...150 В	2,5	21	Вольтметр	0...20 В	0,5
7	Амперметр	0...1 А	0,1	22	Амперметр	0...3 А	1,0
8	Ваттметр	0...300 Вт	0,2	23	Ваттметр	-10...90 Вт	1,5
9	Фазометр	-90...90°	0,1	24	Фазометр	-90...90°	2,5
10	Омметр	0...2 кОм	2,5	25	Омметр	0...2 МОм	1,5
11	Вольтметр	0...250 В	1,5	26	Вольтметр	0...15 В	0,5
12	Амперметр	0...5 А	1,5	27	Амперметр	0...15 А	2,5
13	Ваттметр	0...450 Вт	0,5	28	Ваттметр	0...75 Вт	1,0
14	Фазометр	-90...90°	0,5	29	Фазометр	-90...90°	0,2
15	Омметр	0...20 кОм	4	30	Омметр	0...20 МОм	2,5

Задача 1.2. Из миллиамперметра (микроамперметра) на ток измерительного механизма $I_{им}$ с внутренним сопротивлением

$R_{\text{им}} = 100 \text{ Ом}$ необходимо сделать амперметр на ток I и вольтметр на напряжение U , заданные в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Варианты задачи 1.2 для самостоятельного решения

Вариант	$I_{\text{им}}, \text{мА}$	$R_{\text{им}}, \text{Ом}$	$I, \text{А}$	$U, \text{В}$	Вариант	$I_{\text{им}}, \text{мкА}$	$R_{\text{им}}, \text{кОм}$	$I, \text{А}$	$U, \text{В}$
1	1	1000	1	10	16	5	10	1	10
2	2,5	750	2	10	17	10	10	2	10
3	5	750	3	15	18	15	7,5	3	15
4	10	500	5	15	19	20	7,5	5	15
5	15	250	7,5	25	20	25	5	7,5	25
6	20	150	10	25	21	30	5	10	25
7	25	100	15	50	22	40	4	15	50
8	30	75	15	50	23	50	4	15	50
9	40	50	25	100	24	75	3	25	100
10	50	25	50	100	25	100	3	50	100
11	75	20	75	150	26	150	2,5	75	150
12	100	15	100	250	27	200	2,5	100	250
13	150	10	100	250	28	250	2	100	250
14	250	2	150	300	29	500	2	150	300
15	500	1	150	500	30	750	1	150	500

Задача 1.3. Из вольтметра на напряжение $U_{\text{им}}$ (табл. 1.3) с внутренним сопротивлением $R_{\text{им}}$ необходимо сделать вольтметр на напряжение U .

Таблица 1.3

Варианты задачи 1.3 для самостоятельного решения

Вариант	$U_{\text{им}}, \text{В}$	$R_{\text{им}}, \text{кОм}$	$U, \text{В}$	Вариант	$U_{\text{им}}, \text{В}$	$R_{\text{им}}, \text{кОм}$	$U, \text{В}$
1	1	0,5	5	16	1	1,25	15
2	1	0,75	10	17	1	2	25
3	1	1	15	18	1	2,5	30
4	2,5	1	25	19	2,5	2,5	40
5	2,5	1,5	30	20	2,5	5	50
6	2,5	2	50	21	2,5	7,5	50
7	3	2	75	22	3	7,5	75
8	3	2,5	100	23	3	10	75
9	3	3	150	24	3	15	100
10	5	3	200	25	5	15	150

Вариант	$U_{им}, В$	$R_{им}, кОм$	$U, В$	Вариант	$U_{им}, В$	$R_{им}, кОм$	$U, В$
11	5	5	250	26	5	20	300
12	5	7,5	300	27	5	25	500
13	10	7,5	500	28	10	25	250
14	10	10	600	29	10	40	100
15	10	15	750	30	10	50	150

Контрольные вопросы

1. Какие системы измерительных приборов используются в электрических цепях постоянного тока?
2. Как осуществляется расширение предела измерения амперметра и вольтметра постоянного тока?
3. Какие существуют виды погрешностей? Дайте им характеристику.
4. Что такое абсолютная, относительная и приведенная погрешность?
5. По какой погрешности устанавливается класс точности электроизмерительных приборов?
6. Какие требования предъявляются к эталонному прибору?
7. Как определить абсолютную погрешность, допускаемую заданным прибором?

Практическое занятие № 2

ОСНОВЫ РАСЧЕТА ПРОСТЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА. ЦЕПИ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ, ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ И СМЕШАННЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

Рабочее место: аудитория.

Время проведения занятия: 90 мин.

Цели занятия: освоить методы расчета простых электрических цепей постоянного тока при различных видах соединения потребителей в этих цепях.

Общие сведения

Основные законы, определяющие расчет простых электрических цепей:

1. Закон Ома для участка цепи

$$I = \frac{U}{R},$$

где I – сила тока на участке цепи, А;

U – падение напряжения на этом участке, В;

R – электрическое сопротивление данного участка, Ом.

2. Закон Ома для полной электрической цепи

$$I = \frac{E}{R_3 + R_{\text{вн}}},$$

где I – сила тока в цепи, А;

E – электродвижущая сила (ЭДС), приложенная ко всей цепи, В;

$R_{\text{вн}}$ – внутреннее сопротивление источника электрической энергии, Ом;

R_3 – эквивалентное сопротивление внешней электрической цепи.

3. Закон Джоуля-Ленца

$$P = I^2 R = \frac{U^2}{R}.$$

4. Зависимости для последовательного соединения элементов

$$I = I_1 = I_2; U = U_1 + U_2; R_3 = R_1 + R_2.$$

5. Зависимости для параллельного соединения элементов

$$U = U_1 = U_2 = U_3; I = I_1 + I_2 + I_3; R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

На основе этих законов разработан ряд практических методов расчета электрических цепей постоянного тока, позволяющих сократить вычисления.

Существенно упростить вычисления, а в некоторых случаях и снизить трудоемкость расчета возможно с помощью метода эквивалентных преобразований схемы.

Параллельные и последовательные соединения элементов, соединение «звезда» преобразуют в эквивалентный «треугольник» и наоборот. Источник тока заменяют эквивалентным источником ЭДС. Методом эквивалентных преобразований теоретически можно рассчитать любую цепь, используя при этом простые вычислительные средства, или же определить ток в какой-либо одной ветви без расчета тока других участков цепи.

Рассмотрим примеры расчета линейных электрических цепей постоянного тока с использованием метода эквивалентных преобразований типовых схем соединения источников и потребителей энергии.

Примеры решения задач

Задача 2.1. Для цепи (рис. 2.1) определить эквивалентное сопротивление относительно входных зажимов $a-g$, если $R_1 = R_2 = 0,5$ Ом, $R_3 = 8$ Ом, $R_4 = R_5 = 1$ Ом, $R_6 = 12$ Ом, $R_7 = 15$ Ом, $R_8 = 2$ Ом, $R_9 = 10$ Ом, $R_{10} = 20$ Ом.

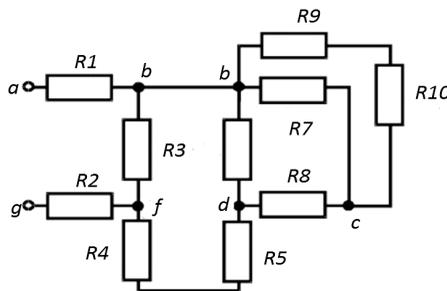


Рис. 2.1. Расчетная схема для задачи 2.1

Решение

Проведем эквивалентные преобразования схемы, начиная с ветви, наиболее удаленной от источника, т. е. от зажимов $a-g$:

$$R_{11} = R_9 + R_{10} = 10 + 20 = 30 \text{ Ом}; \quad R_{12} = \frac{R_{11}R_7}{R_{11} + R_7} = \frac{30 \times 15}{30 + 15} = 10 \text{ Ом};$$

$$R_{13} = R_8 + R_{12} = 2 + 10 = 12 \text{ Ом}; \quad R_{14} = \frac{R_{13}R_6}{R_{13} + R_6} = \frac{12 \times 12}{12 + 12} = 6 \text{ Ом};$$

$$R_{15} = R_{14} + R_5 + R_4 = 6 + 1 + 1 = 8 \text{ Ом}; \quad R_{16} = \frac{R_{15}R_3}{R_{15} + R_3} = \frac{8 \times 8}{8 + 8} = 4 \text{ Ом};$$

$$R_3 = R_1 + R_{16} + R_2 = 0,5 + 4 + 0,5 = 5 \text{ Ом}.$$

Задача 2.2. Для цепи (рис. 2.2, а) определить входное сопротивление, если $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 40 \text{ Ом}$.

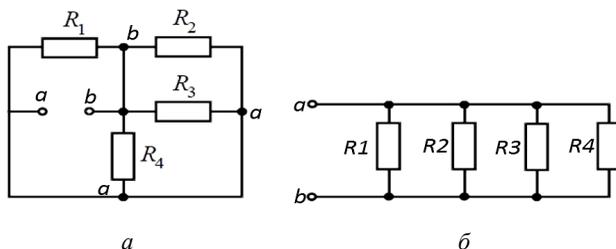


Рис. 2.2. Расчетные схемы для задачи 2.2

Решение

На схеме, перечерченной относительно входных зажимов (рис. 2.2, б), видно, что все сопротивления включены параллельно. Так как величины сопротивлений равны, то для определения величины эквивалентного сопротивления можно воспользоваться формулой

$$R_3 = \frac{R}{n},$$

где R – величина сопротивления, Ом;

n – количество параллельно соединенных сопротивлений.

$$R_3 = \frac{40}{4} = 10 \text{ Ом}.$$

Задача 2.3. Определить эквивалентное сопротивление относительно зажимов $a-b$, если $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = 10 \text{ Ом}$ (рис. 3, а).

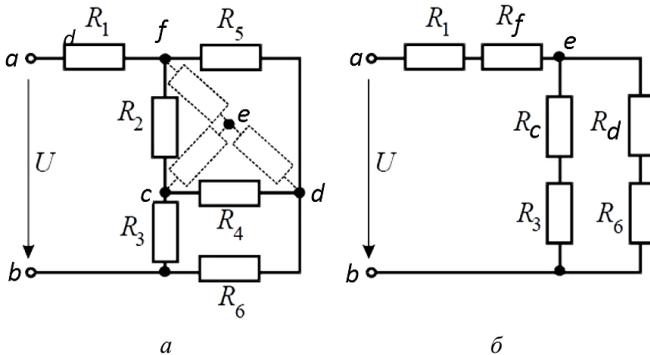


Рис. 2.3. Расчетная схема для задачи 2.3

Решение

Преобразуем соединение «треугольник» $f-d-c$ в эквивалентную «звезду». Определим величины преобразованных сопротивлений (рис. 3, б):

$$R_f = \frac{R_2 R_5}{R_2 + R_5 + R_4} = \frac{10 \times 10}{10 + 10 + 10} = \frac{100}{30} = 3,33 \text{ Ом.}$$

По условию задачи, величины всех сопротивлений равны, а значит:

$$R_f = R_d = R_e = 3,33 \text{ Ом.}$$

На преобразованной схеме получено параллельное соединение ветвей между узлами $e-b$, тогда эквивалентное сопротивление

$$R_{eb} = \frac{(R_c + R_3)(R_d + R_6)}{(R_c + R_3) + (R_d + R_6)} = \frac{(3,33 + 10)(3,33 + 10)}{(3,33 + 10) + (3,33 + 10)} = 6,67 \text{ Ом.}$$

Тогда эквивалентное сопротивление исходной схемы представляет собой последовательное соединение сопротивлений:

$$R_{ab} = R_1 + R_f + R_{eb} = 10 + 3,33 + 6,67 = 20 \text{ Ом.}$$

Задача 2.4. В заданной цепи (рис. 2.4, а) определить методом эквивалентных преобразований входные сопротивления ветвей $a-b$, $c-d$

и $f-b$, если $R_1 = 4 \text{ Ом}$, $R_2 = 8 \text{ Ом}$, $R_3 = 4 \text{ Ом}$, $R_4 = 8 \text{ Ом}$, $R_5 = 2 \text{ Ом}$, $R_6 = 8 \text{ Ом}$, $R_7 = 6 \text{ Ом}$, $R_8 = 8 \text{ Ом}$.

Решение

Для определения входного сопротивления ветвей исключим из схемы все источники ЭДС. Точки c и d , а также b и f соединятся накоротко, т. к. внутренние сопротивления идеальных источников напряжения равны нулю.

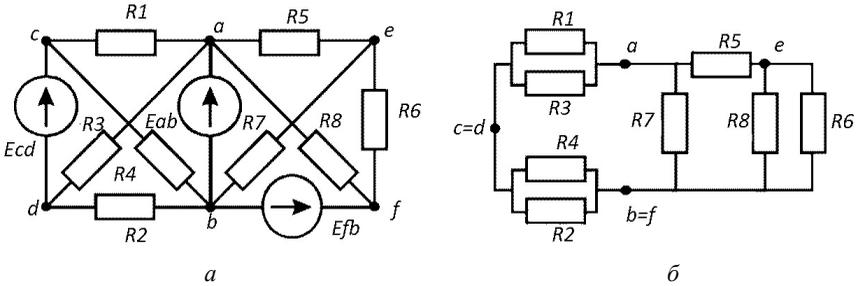


Рис. 2.4. Расчетная схема для задачи 2.4

Ветвь $a-b$ разрывают, и т. к. сопротивление $R_{a-b} = 0$, то входное сопротивление ветви равно эквивалентному сопротивлению схемы относительно точек a и b (рис. 2.4, б):

$$R_{ab}^{\text{в}} = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} + \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_4} = \frac{4 \times 4}{4 + 4} + \frac{8 \times 8}{8 + 8} = 6 \text{ Ом};$$

$$R_{ab}^{\text{с}} = \frac{\frac{R_5 R_8}{R_6 + R_8} + R_7}{R_5 + \frac{R_6 R_8}{R_6 + R_8} + R_7} = \frac{\frac{2 \times 8}{8 + 8} + 6}{2 + \frac{8 \times 8}{8 + 8} + 6} = 3 \text{ Ом};$$

$$R_{ab}^{\text{вс}} = \frac{R_{ab}^{\text{с}} R_{ab}^{\text{в}}}{R_{ab}^{\text{с}} + R_{ab}^{\text{в}}} = \frac{6 \times 3}{6 + 3} = 2 \text{ Ом}.$$

Аналогично методом эквивалентных преобразований определим входные сопротивления ветвей R_{cd} и R_{bf} . При вычислении следует

учесть, что соединение накоротко точек a и b исключает из схемы («закорачивает») сопротивление R_1, R_2, R_3, R_4 в первом случае и R_5, R_6, R_7, R_8 во втором.

$$R_{cd} = \frac{R_1 R_4}{R_1 + R_4} + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = \frac{4 \times 8}{4 + 8} + \frac{8 \times 4}{8 + 4} = \frac{16}{3} \text{ Ом};$$

$$R_{bf} = \frac{\frac{R_5 R_8}{R_5 + R_8} + R_7}{R_6 + \frac{R_5 R_8}{R_5 + R_8} + R_7} = \frac{\frac{2 \times 8}{2 + 8} + 6}{8 + \frac{2 \times 8}{2 + 8} + 6} = \frac{48}{13} \text{ Ом}.$$

Задача для самостоятельного решения

Провести полный расчет цепи постоянного тока с проверкой по балансу мощностей. Варианты задачи принять по таблице.

Таблица

Варианты задачи для самостоятельного решения

Вариант	Схема на рис. 2.5	U, B	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$R_3, \text{ Ом}$	$R_4, \text{ Ом}$	$R_5, \text{ Ом}$
1	a	50	1,25	2	7,5	5	3
2	b	60	4	20	30	40	10
3	$в$	100	3	10	40	7	2
4	$г$	120	4	2	40	10	40
5	$д$	60	14	30	4	12	8
6	e	70	4	6	0	4	4,6
7	a	100	1,6	1	∞	4	5
8	b	120	0	10	20	30	20
9	$в$	80	3	∞	3	4	1,9
10	$г$	60	0	1,9	6	3	7
11	$д$	10,5	1,4	7	0	2	8
12	e	50	9	20	30	70	8
13	a	80	3,6	0	1	1	2
14	e	100	20	20	10	∞	8
15	$г$	100	1	50	40	∞	10

Вариант	Схема на рис. 2.5	$U, В$	$R_1, Ом$	$R_2, Ом$	$R_3, Ом$	$R_4, Ом$	$R_5, Ом$
16	<i>a</i>	100	1,25	2	7,5	5	3
17	<i>б</i>	60	7	20	30	10	10
18	<i>в</i>	120	3	30	40	7	12
19	<i>г</i>	150	7	2	40	10	40
20	<i>д</i>	120	14	30	4	12	8
21	<i>e</i>	100	4	6	4	0	2,6
22	<i>a</i>	10	2,6	1	∞	4	5
23	<i>б</i>	100	8	10	20	30	20
24	<i>в</i>	100	3	∞	3	4	2,9
25	<i>г</i>	50	0	2,9	5	3	7
26	<i>д</i>	21	1,4	7	0	2	8
27	<i>e</i>	90	9	20	30	70	18

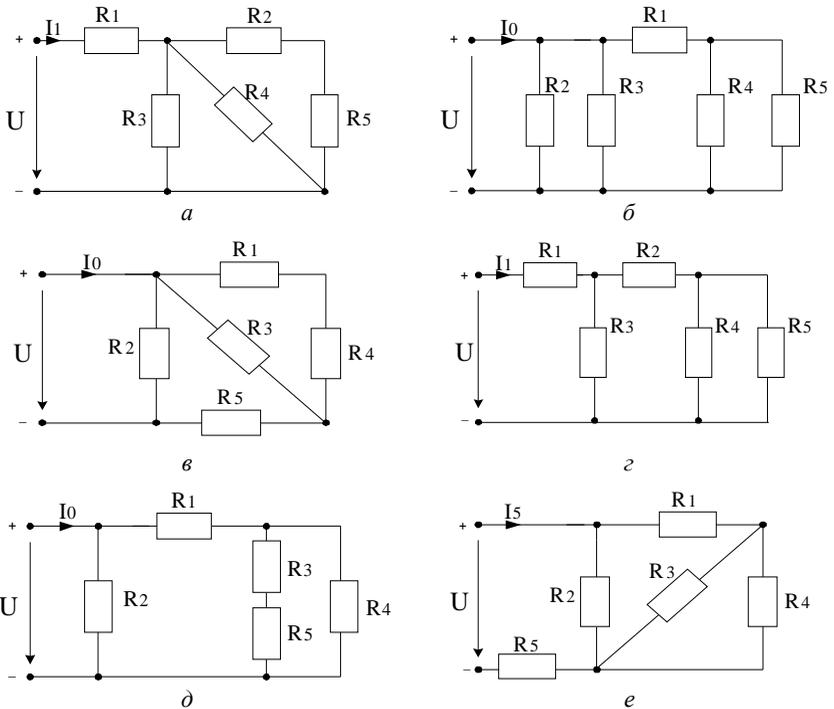


Рис. 2.5. Схемы для решения задачи

Контрольные вопросы

1. Как формулируется закон Ома для участка цепи?
2. Как формулируется закон Ома для полной электрической цепи?
3. Какое соединение потребителей в электрической цепи называется последовательным?
4. Какое соединение потребителей в электрической цепи называется параллельным?
5. Что такое эквивалентное преобразование участка электрической цепи?
6. Какие зависимости между электрическими величинами наблюдаются при последовательном соединении потребителей?
7. Какие зависимости между электрическими величинами наблюдаются при параллельном соединении потребителей?

Практическое занятие № 3

РАСЧЕТ СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА. МЕТОДЫ НЕПОСРЕДСТВЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ УРАВНЕНИЙ КИРХГОФА И КОНТУРНЫХ ТОКОВ

Рабочее место: аудитория.

Время проведения занятия: 90 мин.

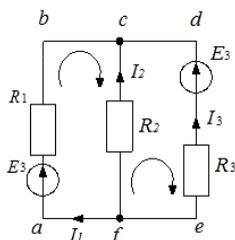
Цель работы: научиться использовать для расчета сложных электрических цепей метод непосредственного применения уравнений Кирхгофа, метод контурных токов.

Общие сведения

Сложной называют электрическую цепь, имеющую в своем составе более одного источника электрической энергии. Обычно такие цепи рассчитывают на основании первого и второго законов Кирхгофа.

Рассмотрим сложную цепь (рис. 3.1), расчет которой сводится к определению токов I_1 , I_2 , I_3 . Значения ЭДС и сопротивлений заданы.

Для расчета сложных цепей существует несколько методов. Подавляющее большинство из них основаны на первом и втором законах Кирхгофа, применяемых к конструктивным элементам электрических цепей.



3 ветви: $cbaf$, cf , $cdef$.
 2 узла: c , f .
 2 контура: $cfabc$, $fcdef$.

Рис. 3.1. Пример сложной электрической цепи

Конструктивные элементы сложных электрических цепей:

– *ветвь* – участок электрической схемы, на котором все элементы соединены последовательно и по которому протекает один и тот же ток. Цепь на рис. 3.1 состоит из трех ветвей;

– *узел* – точка соединения трех и более ветвей. В цепи на рис. 3.1 можно выделить три узла;

– *контур* – кратчайший замкнутый путь тока, состоящий из двух и более ветвей. В цепи на рис. 3.1 выделяют два контура.

Законы Кирхгофа устанавливают соотношения между токами и напряжениями в сложных разветвленных электрических цепях произвольного типа. Законы Кирхгофа имеют особое значение в электротехнике благодаря своей универсальности, т. к. пригодны для решения любых электротехнических задач. Законы Кирхгофа справедливы для линейных и нелинейных цепей при постоянных и переменных напряжениях и токах.

Первый закон Кирхгофа вытекает из закона сохранения энергии – алгебраическая сумма токов, сходящихся в любом узле, равна нулю:

$$\sum_{n=3}^{\infty} I_n = 0,$$

где n – число токов, сходящихся в данном узле.

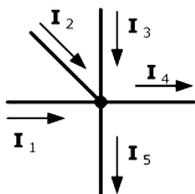


Рис. 3.2. Узел электрической цепи

Например, для узла электрической цепи (рис. 3.2) уравнение по первому закону Кирхгофа можно записать в виде $I_1 + I_2 + I_3 - I_4 - I_5 = 0$. В этом уравнении токи, направленные к узлу, приняты положительными.

Физически первый закон Кирхгофа – это закон непрерывности электрического тока.

Второй закон Кирхгофа: алгебраическая сумма падений напряжений на отдельных участках замкнутого контура, произвольно выделенного в сложной разветвленной цепи, равна алгебраической сумме ЭДС в этом контуре:

$$\sum_{m=0}^{\infty} E_m = \sum_{n=1}^{\infty} I_n R_n,$$

где m – число источников ЭДС;

n – число ветвей в замкнутом контуре;

I_n, R_n – ток и сопротивление n -й ветви.

Так, для замкнутого контура схемы (рис. 3.3) $I_1 R_1 - I_2 R_2 + I_3 R_3 - I_4 R_4 = E_1 - E_2 + E_3$.

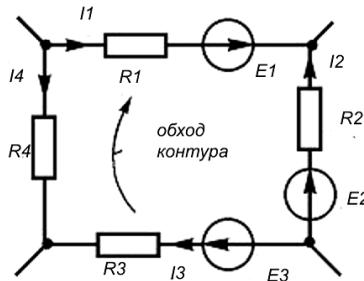


Рис. 3.3. Пример контура для записи уравнения

ЭДС положительна, если ее направление совпадает с направлением произвольно выбранного обхода контура. Падение напряжения на резисторе положительно, если направление тока в нем совпадает с направлением обхода.

Физически второй закон Кирхгофа характеризует равновесие напряжений в любом контуре цепи.

Метод непосредственного применения уравнений Кирхгофа

Необходимо составить систему уравнений по законам Кирхгофа, в которой общее количество уравнений равняется количеству ветвей в цепи. Из них согласно первому закону Кирхгофа составляется на одно уравнение меньше, чем количество узлов, а согласно второму

количество уравнений равно количеству контуров. Для рис. 3.1 общее количество уравнений – три, из них одно по первому закону Кирхгофа и два по второму.

Направление токов выбирают произвольно. Если в результате решения некоторые токи окажутся отрицательными, это будет означать, что в действительности они проходят в направлении, противоположном выбранному. Для определения трех неизвестных токов необходимо составить три независимых уравнения, связывающих эти токи.

На основании первого закона Кирхгофа для узла c (рис. 3.1)

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

Недостающие уравнения получаем на основании второго закона Кирхгофа. Для контура $abcf$ (рис. 3.1) определим потенциал точки a относительно той же точки, совершив обход этого контура по часовой стрелке:

$$I_1 R_1 - I_2 R_2 = E_1.$$

Таким образом, алгебраическая сумма ЭДС любого замкнутого контура равна алгебраической сумме падения напряжений этого контура.

Если направление обхода контура совпадает с направлением ЭДС и токов, то эти ЭДС и соответствующие падения напряжений берут со знаком плюс, в противном случае они отрицательны. Данное уравнение позволяет получить новое соотношение между неизвестными токами. Для контура $fcde$

$$I_2 R_2 - I_3 R_3 = -E_3.$$

Объединим уравнения в систему:

$$\begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 = 0; \\ I_1 R_1 - I_2 R_2 = E_1; \\ I_2 R_2 - I_3 R_3 = -E_3. \end{cases}$$

При составлении уравнений по второму правилу Кирхгофа контуры нужно выбирать так, чтобы каждый из них отличался хотя бы одной ветвью.

Пример 1. Рассчитать цепь на рис. 3.1, если $E_1 = 246$ В; $E_2 = 230$ В; $R_1 = 0,3$ Ом; $R_2 = 1$ Ом; $R_3 = 24$ Ом.

Решение

Подставим вместо буквенных обозначений в системе числовые значения:

$$\begin{cases} I_1 + I_2 + I_3 = 0; \\ 0,3I_1 - I_2 = 246; \\ I_2 - 24I_3 = -230. \end{cases}$$

Решив систему, получим: $I_1 = 188$ А; $I_2 = -190$ А; $I_3 = -1,68$ А. Знак минус у тока I_2 означает, что его направление противоположно направлению, принятому на рис. 3.1, и источник E_2 является потребителем энергии.

Метод контурных токов

Если сложная цепь содержит много узлов и контуров, то ее расчет с помощью первого и второго законов Кирхгофа будет связан с решением большого числа уравнений. Вводя понятие о контурных токах, можно свести уравнения, составленные по правилам Кирхгофа, к системе уравнений, составленных только для независимых контуров.

Под *контурными токами* понимают условные токи, замыкающиеся в соответствующих контурах.

Рассмотрим схему цепи, представленную на рис. 3.4. Эта схема имеет два независимых контура I и II, в каждом из которых проходят токи I_{11} и I_{22} . Направления этих токов выбираются произвольными, например по часовой стрелке.

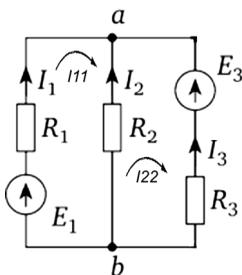


Рис. 3.4. Направление течения контурных токов

Согласно схеме реальные токи во внешних ветвях равны контурным: $I_1 = I_{11}$; $I_3 = I_{22}$. Ток во внутренней ветви равен разности контурных токов: $I_2 = I_{22} - I_{11}$.

Для определения контурных токов составим два уравнения:

$$I_{11}(R_1 + R_2) - I_{22}R_2 = E_1;$$

$$I_{22}(R_2 + R_3) - I_{11}R_2 = -E_3.$$

Пример 2. Рассчитать цепь на рис. 3.4 по данным примера 1.

Решение

На основании системы уравнений, полученной для рис. 3.4, имеем:

$$1,3I_{11} - I_{22} = 246;$$

$$25I_{22} - I_{11} = -230.$$

Решив систему, получим:

$$I_{11} = I_1 = 188 \text{ А};$$

$$I_{22} = I_3 = -1,68 \text{ А};$$

$$I_2 = I_{22} - I_{11} = -1,68 - 188 = -190 \text{ А}.$$

Задание для самостоятельного выполнения

По вариантам провести расчет сложной электрической цепи методом непосредственного применения уравнений Кирхгофа и методом контурных токов (таблица, рис. 3.5).

Таблица

Варианты задания для самостоятельного выполнения

Вариант	Схема на рис. 3.5	Элементы, входящие в электрическую цепь						
		$E_1, \text{ В}$	$E_2, \text{ В}$	$E_3, \text{ В}$	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$R_3, \text{ Ом}$	$R_4, \text{ Ом}$
1	<i>a</i>	10	20	40	5	0	0	4
2	<i>б</i>	40	80	20	6	4	2	0
3	<i>в</i>	50	20	30	10	2	5	5
4	<i>г</i>	30	70	20	10	2	4	8
5	<i>д</i>	10	50	20	15	5	3	7
6	<i>a</i>	20	0	50	4	6	10	5

Вариант	Схема на рис. 3.5	Элементы, входящие в электрическую цепь						
		$E_1, \text{В}$	$E_2, \text{В}$	$E_3, \text{В}$	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$R_3, \text{Ом}$	$R_4, \text{Ом}$
7	<i>б</i>	0	50	20	5	10	4	6
8	<i>в</i>	40	0	80	6	4	2	8
9	<i>з</i>	100	20	0	20	30	40	10
10	<i>д</i>	0	60	30	8	10	2	4
11	<i>а</i>	50	20	30	4	6	10	5
12	<i>б</i>	30	0	70	2	4	10	3
13	<i>в</i>	40	60	0	5	10	2	8
14	<i>з</i>	0	20	40	5	10	4	4
15	<i>д</i>	60	0	20	2	5	4	6

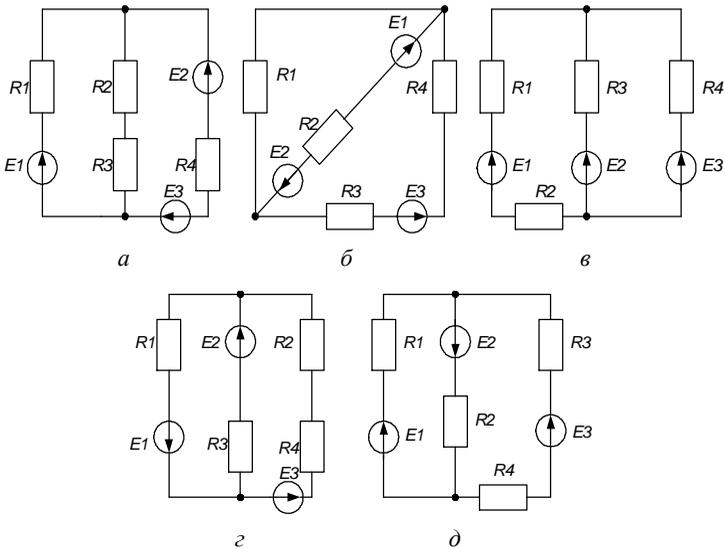


Рис. 3.5. Схемы для решения задачи

Контрольные вопросы

1. Какие существуют виды конструктивных элементов сложных электрических цепей?
2. Для каких величин является справедливым первый закон Кирхгофа?
3. Как формулируется второй закон Кирхгофа?

4. Как определить количество уравнений, которые необходимо составить для расчета электрической цепи методом непосредственного применения уравнений Кирхгофа?

5. Какова последовательность действий при расчете электрических цепей методом контурных токов?

Практическое занятие № 4

ФОРМЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ВЕЛИЧИН ПЕРЕМЕННОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Рабочее место: аудитория.

Время проведения занятия: 90 мин.

Цель занятия: усвоить основные понятия и величины, характеризующие переменный синусоидальный ток; овладеть методами представления его векторами и комплексными числами.

Общие сведения

Переменным называют ток, изменяющийся во времени. Переменный ток, который описывается синусоидальной функцией, называется *синусоидальным током*.

В общем случае электродвижущую силу e , под действием которой протекает ток i , можно представить при помощи тригонометрической функции

$$e = E_m \sin(\omega t + \psi).$$

Графически ЭДС можно изобразить в виде временных диаграмм (рис. 4.1).

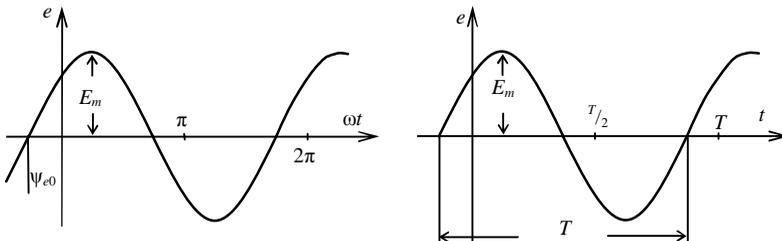


Рис. 4.1. Временные диаграммы ЭДС

Основные понятия и величины, характеризующие синусоидальный ток: период, частота, амплитуда, угловая (циклическая) частота, фаза, начальная фаза.

Периодом называется время одного полного колебания. Период обозначается буквой T и измеряется в секундах (с). Величина, обратная периоду T , т. е. число периодов в единицу времени, называется *частотой*, обозначается буквой f и измеряется в герцах (Гц):

$$f = \frac{1}{T},$$

где e – мгновенное значение ЭДС;

E_m – максимальное значение или амплитуда;

ω – угловая (циклическая) частота, рад/с; $\omega = 2\pi f$;

ψ – начальная фаза, определяемая смещением начала синусоиды относительно начала координат (началом синусоиды считается точка перехода отрицательной полуволны в положительную).

Угол ψ положителен в том случае, если начало синусоиды смещено влево от начала координат, и отрицателен, если смещено вправо.

Величина $(\omega t + \psi)$, определяющая стадию изменения синусоидальной функции, называется *фазовым углом*, или *фазой*.

При расчете цепей синусоидального тока наряду с амплитудным значением тока широко используется понятие действующего значения. Действующие значения синусоидального тока, напряжения, ЭДС связаны с их амплитудными значениями через соотношения

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

Для облегчения расчетов и анализа цепей синусоидального тока широко применяется метод представления синусоидальных функций векторами и комплексными числами: синусоидальной величине ставится в соответствие вектор на комплексной плоскости.

При изображении синусоидальных ЭДС, токов и напряжений вращающимися векторами на декартовой плоскости из начала координат проводят вектор, равный амплитудному значению, и вращают этот вектор *против* часовой стрелки с угловой скоростью, равной угловой частоте ω . Фазовый угол при вращении отсчитывают

от положительной оси абсцисс (оси x). Проекции вращающегося вектора на ось ординат равны мгновенным значениям синусоидальной величины. На рис. 4.2 показано синусоидальное напряжение $u = U_m \sin(\omega t - \psi)$.

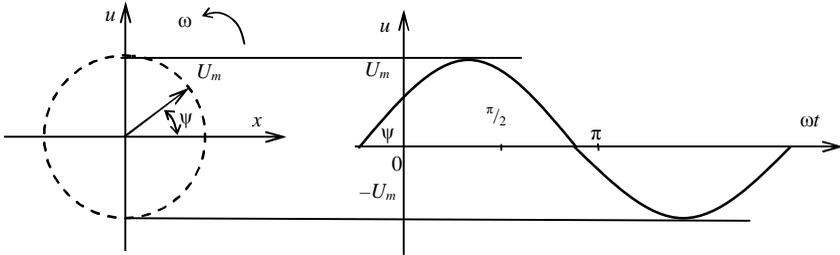


Рис. 4.2. Схема вращения вектора U_m с разверткой проекции его вращения на ось времени

Длина вектора (модуль) равна амплитуде синусоидальной величины. Вектор строится выходящим из начала координат под углом ψ к действительной положительной полуоси комплексной плоскости. Если $\psi > 0$, то вектор повернут против часовой стрелки, если $\psi < 0$, то по часовой.

В свою очередь, данный вектор может быть аналитически представлен комплексным числом, которое получило название комплексной амплитуды. Как и любое комплексное число, ее можно записать в показательной, тригонометрической и алгебраической формах.

При переходе от синусоидальной функции к записи ее комплексной амплитуды удобнее всего пользоваться показательной формой. Модуль комплексного числа берется равным амплитуде синусоидальной величины, а аргумент - углу ψ .

Разделив комплексную амплитуду на $\sqrt{2}$, получим комплексное действующее значение синусоидальной величины:

$$\dot{I} = \frac{\dot{I}_m}{\sqrt{2}}; \quad \dot{U} = \frac{\dot{U}_m}{\sqrt{2}}; \quad \dot{E} = \frac{\dot{E}_m}{\sqrt{2}}.$$

Имея комплексную амплитуду или комплексное действующее значение, можно осуществить обратный переход и записать выражение мгновенного значения соответствующей синусоидальной величины.

Примеры решения задач

Задача 4.1. Задано выражение мгновенного значения синусоидального тока $i = 10\sin(314t + 60^\circ)$. Определить амплитуду тока I_m , действующее значение I , период T , частоту f , угловую частоту ω , начальную фазу ψ .

Решение

$$I_m = 10 \text{ А}; \quad I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{10}{\sqrt{2}} = 7,07 \text{ А}; \quad \omega = 314 \text{ рад/с}; \quad \psi = 60^\circ;$$

$$\omega = 2\pi f; \quad f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{314}{2 \times 3,14} = 50 \text{ Гц}; \quad T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0,02 \text{ с}.$$

Задача 4.2. Задано мгновенное значение синусоидальной ЭДС $e = 100\sin(\omega t + 120^\circ)$. Построить на комплексной плоскости вектор, изображающий эту ЭДС, и записать ее комплексную амплитуду.

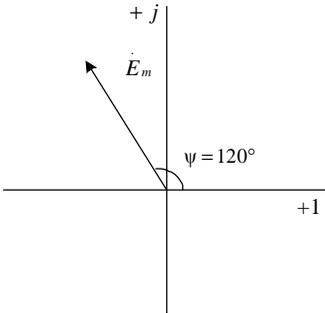


Рис. 4.3. Вектор \underline{E}_m на комплексной плоскости

Решение

Строим на комплексной плоскости вектор \underline{E}_m , длина которого в масштабе равна 100 В, направленный под углом $\psi = 120^\circ$ к действительной положительной полуоси (рис. 4.3). Записываем комплексную амплитуду, В:

$$\underline{E}_m = 100e^{j120^\circ} = 100(\cos 120^\circ + j \sin 120^\circ) = -50 + j86,6.$$

Задача 4.3. Задано комплексное действующее значение тока $\underline{I} = 5 + j5$ при известной частоте питающего тока $f = 100$ Гц. Записать выражение его мгновенного значения.

Решение

Определяем действующее значение тока как модуль комплексного действующего значения тока:

$$I = \sqrt{5^2 + 5^2} = 7,07 \text{ А}.$$

Определяем амплитуду тока, умножив действующее значение на $\sqrt{2}$:

$$I_m = I\sqrt{2} = 7,07\sqrt{2} = 10 \text{ А.}$$

Определяем начальную фазу как арктангенс отношения величины мнимой части комплексного значения тока к вещественной части:

$$\psi = \arctg \frac{5}{5} = 45^\circ.$$

Записываем выражение мгновенного значения синусоидального тока, А:

$$i = 10\sin(\omega t + 45^\circ).$$

Замечание: при определении угла ψ следует иметь в виду, что арктангенс отношения мнимой части комплексного числа к его вещественной части даст истинное значение угла в том случае, если вектор находится в первом или четвертом квадранте.

Если же вектор расположен во втором либо третьем квадранте, то к полученному значению угла необходимо прибавить 180° .

Чтобы избежать ошибки, рекомендуется оценить величину угла, предварительно построив вектор на комплексной плоскости.

Задачи для самостоятельного решения

Задача 4.1. Ток в ветви изменяется гармонически с амплитудой 2 А и частотой 50 Гц (рис. 4.4). Написать выражение для мгновенного значения тока в виде синусоидальной функции времени, приняв за начало отсчета времени точки 0_1 , 0_2 , 0_3 и 0_4 .

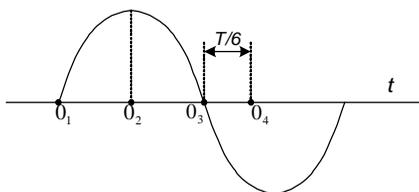
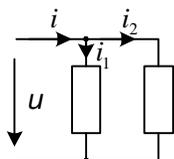


Рис. 4.4. Условие задачи 4.4

Задача 4.2. Выражение мгновенного значения синусоидального тока имеет вид: $i = 5 \sin 628t + \frac{\pi}{3}$. Определить период T , частоту f , действующее значение тока I . Нарисовать синусоиду тока и построить на комплексной плоскости вектор, отображающий данный ток.

Задача 4.3. Определить ток i , А (рис. 4.5), если



$$i_1 = 14,1 \sin(\omega t + 45^\circ);$$

$$i_2 = 28,2 \sin(\omega t - 30^\circ).$$

Рис. 4.5. Условие задачи 4.3

Задача 4.4. Записать выражение мгновенного значения синусоидального напряжения, если комплексное действующее значение напряжения, В:

$$\underline{U} = -80 - j60.$$

Индивидуальное задание

По выражению мгновенного значения синусоидального тока i или напряжения u согласно варианту в таблице определить амплитудное, действующее значение величины, период T , угловую частоту ω , частоту f , фазу, начальную фазу ψ .

Нарисовать кривую изменения величины во времени и построить на комплексной плоскости вектор, изображающий действующее значение тока i или напряжения u . Записать комплексную форму представления величины в алгебраической и показательной форме записи.

Таблица

Варианты индивидуального задания

Номер варианта	Выражение тока i	Номер варианта	Выражение напряжения u
1	$i = 400 \sin(314t + 135^\circ)$	16	$u = 282 \sin(314t + 120^\circ)$
2	$i = 5 \sin(314t - \frac{\pi}{6})$	17	$u = 564 \sin(628t - \frac{\pi}{6})$
3	$i = 80 \sin(942t + 60^\circ)$	18	$u = 141 \sin(1256t - 60^\circ)$

Номер варианта	Выражение тока i	Номер варианта	Выражение напряжения u
4	$i = 15\sin(628t + \frac{\pi}{2})$	19	$u = 5,64\sin(628t + \frac{\pi}{2})$
5	$i = 205\sin(628t - 120^\circ)$	20	$u = 2,82\sin(942t - 120^\circ)$
6	$i = 40\sin(157t - 240^\circ)$	21	$u = 141\sin(157t + 120^\circ)$
7	$i = 60\sin(314t + \frac{\pi}{3})$	22	$u = 2820\sin(314t + \frac{\pi}{3})$
8	$i = 25\sin(314t - 60^\circ)$	23	$u = 28,2\sin(314t - 60^\circ)$
9	$i = 30\sin(314t + \frac{\pi}{6})$	24	$u = 56,4\sin(314t - \frac{\pi}{6})$
10	$i = 70\sin(157t - \frac{\pi}{4})$	25	$u = 400\sin(1570t + \frac{\pi}{4})$
11	$i = 20\sin(157t - \frac{\pi}{2})$	26	$u = 200\sin(314t - \frac{\pi}{2})$
12	$i = 127\sin(1256t + 60^\circ)$	27	$u = 282\sin(1256t + 60^\circ)$
13	$i = 127\sin(157t - \frac{2\pi}{3})$	28	$u = 564\sin(157t - \frac{2\pi}{3})$
14	$i = 200\sin(314t - \frac{\pi}{2})$	29	$u = 200\sin(314t - \frac{\pi}{2})$
15	$i = 220\sin(628t + \frac{2\pi}{3})$	30	$u = 700\sin(628t - \frac{2\pi}{3})$

Контрольные вопросы

1. Что такое период, частота?
2. Как определяется угловая частота?
3. Что такое фаза, начальная фаза?
4. Что называют началом синусоиды?
5. Как определяется действующее значение синусоидального тока?
6. Каковы правила изображения синусоидальной функции вектором?
7. Что такое комплексная амплитуда? Как ее записать?
8. Что такое комплексное действующее значение? Как его получить?
9. Как осуществить переход от комплексной амплитуды и комплексного действующего значения к выражению мгновенного выражения величины?

Практическое занятие № 5

РАСЧЕТ РАЗВЕТВЛЕННЫХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА В КОМПЛЕКСНЫХ ЧИСЛАХ

Рабочее место: аудитория.

Время проведения занятия: 90 мин.

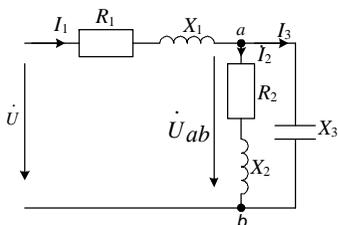
Цель занятия: освоить методику расчета цепей переменного синусоидального тока со смешанным соединением приемников в комплексных значениях.

Общие сведения

Методика расчета цепей синусоидального тока со смешанным соединением аналогична методике расчета цепей постоянного тока со смешанным соединением (см. практическое занятие № 2), однако расчет проводится в комплексной форме.

Примеры решения задач

Задача 5.1. Определить значения силы тока в цепи (рис. 5.1) и построить векторную диаграмму токов и напряжений.



$$\begin{aligned} R_1 &= 8 \text{ Ом}; X_1 = 6 \text{ Ом}; \\ R_2 &= 3 \text{ Ом}; X_2 = 4 \text{ Ом}; \\ X_3 &= 10 \text{ Ом}; U = 40 \text{ В}. \end{aligned}$$

Рис. 5.1. Схема задачи 5.1

Решение

Принимаем начальную фазу напряжения $\Psi_u = 0$, тогда $\dot{U} = U = 40 \text{ В}$. Записываем комплексные сопротивления ветвей, Ом:

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1 = 8 + j6;$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 + jX_2 = 3 + j4;$$

$$\underline{Z}_3 = -jX_3 = -j10.$$

Определяем эквивалентное комплексное сопротивление всей цепи, Ом (при проведении арифметических действий с комплексными числами учитываем, что $jj = -1$):

– \underline{Z}_2 и \underline{Z}_3 соединены параллельно, поэтому

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{23} &= \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = \frac{(3 + j4)(-j10)}{3 + j4 - j10} = \frac{40 - j30}{3 - j6} = \frac{(40 - j30)(3 + j6)}{(3 - j6)(3 + j6)} = \\ &= \frac{120 - j90 + j240 + 180}{3^2 + 6^2} = \frac{300 + j150}{45} = 6,67 + j3,33;\end{aligned}$$

– \underline{Z}_{23} и \underline{Z}_1 соединены последовательно, поэтому

$$\underline{Z}_{\text{экв}} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{23} = 8 + j6 + 6,67 + j3,33 = 14,67 + j9,33.$$

Определяем ток \underline{I}_1 , А, по закону Ома:

$$\begin{aligned}\underline{I}_1 &= \frac{\underline{U}}{\underline{Z}_{\text{экв}}} = \frac{40(14,67 - j9,33)}{(14,67 + j9,33)(14,67 - j9,33)} = \frac{586,8 - j373,2}{14,67^2 + 9,33^2} = \\ &= \frac{40(14,67 - j9,33)}{(14,67 + j9,33)(14,67 - j9,33)} = \frac{586,8 - j373,2}{14,67^2 + 9,33^2} = 1,94 - j1,23.\end{aligned}$$

Действующее значение тока

$$I_1 = \sqrt{1,94^2 + 1,23^2} = 2,3 \text{ А.}$$

Зная ток \underline{I}_1 , можно рассчитать напряжение \underline{U}_{ab} . Находим падение напряжения, В, на участке с сопротивлением \underline{Z}_1 :

$$\begin{aligned}\underline{U}_1 &= \underline{I}_1 \underline{Z}_1 = (1,94 - j1,23)(8 + j6) = \\ &= 15,52 - j9,84 + j11,64 + 7,38 = 22,9 + j1,8,\end{aligned}$$

затем в соответствии со вторым законом Кирхгофа

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U} - \underline{U}_1 = 40 - (22,9 + j1,8).$$

Напряжение \underline{U}_{ab} , В, можно определить по закону Ома

$$\begin{aligned}\underline{U}_{ab} &= \underline{I}_1 \underline{Z}_{23} = (1,94 - j1,23)(6,67 + j3,33) = \\ &= 12,94 - j8,2 + j6,46 + 4,1 = 17,04 - j1,74.\end{aligned}$$

Определяем токи \underline{I}_2 и \underline{I}_3 , А:

$$\underline{\dot{I}}_2 = \frac{17,04 - j1,74}{3 + j4} = \frac{(17,04 - j1,74)(3 - j4)}{(3 + j4)(3 - j4)} =$$

$$= \frac{51,12 - j5,22 - j68,16 - 6,96}{3^2 + 4^2} = \frac{44,16 - j73,38}{25} = 1,77 - j2,94;$$

$$I_2 = \sqrt{1,77^2 + 2,94^2} = 3,43 \text{ A};$$

$$\underline{\dot{I}}_3 = \frac{\underline{\dot{U}}_{ab}}{\underline{Z}_3} = \frac{17,04 - j1,74}{-j10} = \frac{(17,04 - j1,74)j10}{-j10j10} = \frac{17,4 + j170,4}{100} = 0,17 + j1,7;$$

$$I_3 = \sqrt{0,17^2 + 1,7^2} = 1,71 \text{ A}.$$

Проверка:

$$\underline{\dot{I}}_1 - \underline{\dot{I}}_2 - \underline{\dot{I}}_3 = 0;$$

$$1,94 - j1,23 - 1,77 + j2,94 - 0,17 - j1,7 = 0 + j0,01 \approx 0.$$

Строим векторную диаграмму, откладывая в масштабе на комплексной плоскости векторы токов и напряжений (рис. 5.2).

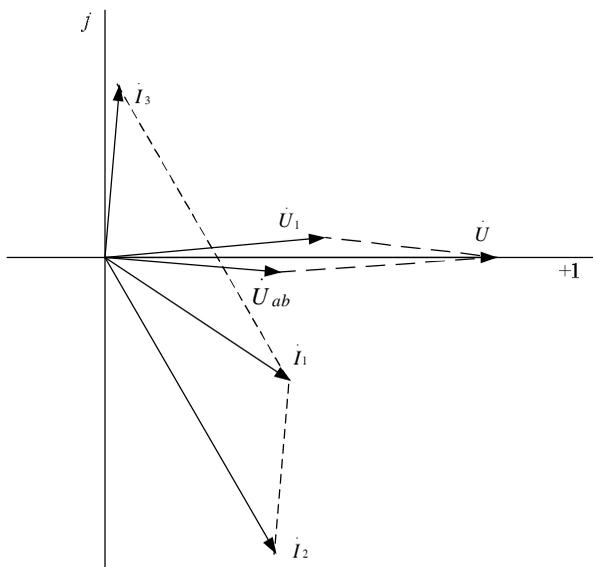
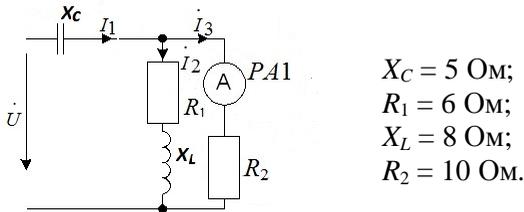


Рис. 5.2. Векторная диаграмма токов и напряжений на комплексной плоскости

Задача 5.2. Определить показания вольтметра $PV1$ (рис. 5.3), если амперметр $PA1$ показывает ток $I_3 = 10$ А.



$X_C = 5$ Ом;
 $R_1 = 6$ Ом;
 $X_L = 8$ Ом;
 $R_2 = 10$ Ом.

Рис. 5.3. Схема к задаче 5.2

Решение

Принимаем начальную фазу тока $\psi_{i3} = 0$, тогда $\underline{I}_3 = I_3 = 10$ А.
 Комплексные сопротивления ветвей, Ом:

$$\underline{Z}_1 = -jX_C = -j5;$$

$$\underline{Z}_2 = R_1 + jX_L = 6 + j8;$$

$$\underline{Z}_3 = R_2 = 10 \text{ Ом.}$$

Напряжение на участке с параллельным соединением ветвей

$$\underline{U}_{ab} = \underline{I}_3 \underline{Z}_3 = 10 \cdot 10 = 100 \text{ В.}$$

По закону Ома ток, А:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}} = \frac{100}{6 + j8} = \frac{100(6 - j8)}{(6 + j8)(6 - j8)} = \frac{600 - j800}{6^2 + 8^2} = 6 - j8.$$

По первому закону Кирхгофа ток на неразветвленном участке, А:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 6 - j8 + 10 = 16 - j8.$$

Тогда напряжения, В:

$$\underline{U}_1 = \underline{I}_1 \underline{Z}_1 = (16 - j8)(-j5) = -40 - j80;$$

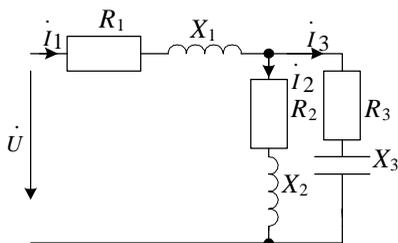
$$\underline{U} = \underline{U}_1 + \underline{U}_{ab} = -40 - j80 + 100 = 60 - j80.$$

Действующее значение напряжения

$$U = \sqrt{60^2 + 80^2} = 100 \text{ В.}$$

Задачи для самостоятельного решения

Задача 5.1. Определить комплексные токи в цепи, А (рис. 5.4), и построить векторную диаграмму токов и напряжений.



$$\begin{aligned}
 U &= 100 \text{ В;} \\
 R_1 &= 6 \text{ Ом}; X_1 = 8 \text{ Ом}; \\
 R_2 &= 3 \text{ Ом}; X_2 = 7 \text{ Ом}; \\
 R_3 &= 2 \text{ Ом}; X_3 = 2 \text{ Ом}.
 \end{aligned}$$

Рис. 5.4. Схема цепи к задаче 5.3

Ответ для контроля:

$$\begin{aligned}
 \underline{I}_1 &= 7,1 - j5,5; \\
 \underline{I}_2 &= -2,36 - j3,05; \\
 \underline{I}_3 &= 9,38 - j2,66.
 \end{aligned}$$

Задача 5.2. В цепи, схема которой представлена на рис. 5.5, $R = 10 \text{ Ом}$, $L = 5,97 \text{ мГн}$, $C = 33,2 \text{ мкФ}$. На входе цепи приложено напряжение $U = 100 \text{ В}$, частота 400 Гц . Считая начальную фазу напряжения на входе равной нулю, определить комплексные токи ветвей, А.

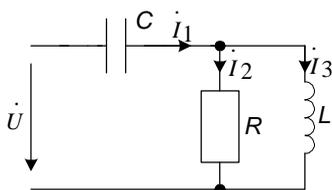


Рис. 5.5. Схема цепи к задаче 5.4

Ответ для контроля:

$$\begin{aligned}
 \underline{I}_1 &= 9,88e^{j46,78^\circ}; \\
 \underline{I}_2 &= 8,32e^{j80,47^\circ}; \\
 \underline{I}_3 &= 5,49e^{-j9,53^\circ}.
 \end{aligned}$$

Индивидуальное задание

К источнику с синусоидальным напряжением U подключена цепь со смешанным соединением сопротивлений Z_1 , Z_2 , Z_3 (см. таблицу). Нарисовать схему цепи, обозначить токи и напряжения в ней. Определить ток в неразветвленной части цепи.

Таблица

Варианты индивидуального задания

Номер варианта	U , В	Z_1 , Ом	Z_2 , Ом	Z_3 , Ом
1	50	$2,8 + j2,1$	$1 + j2$	3
2	400	$8 - j29$	$10 + j20$	30
3	10	$0,4 - j0,8$	1	$1 - j$
4	80	$0,9 + j0,3$	j	$1 + j2$
5	100	$2,6 + j2,8$	$2 + j2$	$j2$
6	200	$0,2 + j0,6$	$1 + j$	2
7	20	$0,8 + j0,4$	$1 + j$	j
8	200	$9 + j3$	$j10$	$10 + j20$
9	100	$1 - j3$	$-j5$	$4 + j2$
10	500	$10 - j30$	$40 + j20$	$-j50$
11	100	$2,6 - j2,8$	$2 - j2$	$-j2$
12	50	$1 - j3$	$4 + j2$	$-j5$
13	80	$0,9 + j0,3$	j	$1 + j2$
14	200	$10 - j30$	$-j30$	$40 + j20$
15	500	$26 - j28$	$20 - j20$	$-j20$

Контрольные вопросы

1. Каков порядок расчета цепи переменного тока со смешанным соединением?
2. Почему расчет цепи переменного тока ведут в комплексной форме?

Практическое занятие № 6

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Рабочее место: аудитория.

Время проведения занятия: 90 мин.

Цель занятия: освоить особенности расчета трехфазных электрических цепей с разными схемами соединения нагрузок при различных режимах включения.

Общие сведения

Трехфазной цепью синусоидального тока называют совокупность трех однофазных цепей, в каждой из которых действуют синусоидальные ЭДС одинаковой амплитуды и частоты, имеющие сдвиг по фазе относительно друг друга на угол 120° .

Источником электрической энергии в трехфазной цепи является синхронный генератор, имеющий три одинаковые обмотки (фазы), расположенные на статоре и сдвинутые в пространстве на угол 120° . Начала обмоток фаз обозначают A, B, C , концы – X, Y, Z соответственно. При вращении ротора, который представляет собой электромагнит постоянного тока, в обмотках статора будут индуцироваться переменные ЭДС, сдвинутые относительно друг друга по фазе на 120° ($2\pi/3$):

$$\begin{cases} e_A = E_m \sin(\omega t); \\ e_B = E_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right); \\ e_C = E_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases}$$

где E_m – амплитудное значение ЭДС фаз генератора.

Если ЭДС трех фаз равны по амплитуде и сдвинуты по фазе на угол 120° , то такую систему называют *симметричной трехфазной системой*.

Для источников и приемников трехфазной цепи существуют две схемы соединений: звездой и треугольником.

Трехфазная цепь при соединении нагрузок звездой с нейтральным проводом

При соединении генератора звездой концы обмоток генератора объединяют в общую точку, называемую нейтральной, обозначают ее буквой N (рис. 6.1). При соединении трехфазного потребителя

звездой концы фаз потребителя объединяют в общую точку, называемую *нейтральной точкой нагрузки*, и обозначают n (рис. 6.1).

Начала фаз потребителя и генератора объединяют проводами, называемыми *линейными*. Провод, соединяющий нейтральные точки генератора и потребителя, называют *нейтральным*. Полученную схему (рис. 6.1) называют «звезда»–«звезда» с нейтральным проводом (четырёхпроводная трехфазная цепь).

Токи, протекающие по линейным проводам, называют линейными токами и обозначают I_A, I_B, I_C или $I_{\text{л}}$. За положительное направление условно принимают направление от генератора к нагрузке. Ток, протекающий по нейтральному проводу, обозначают I_N . Его положительное направление – от нагрузки к генератору (от точки N к точке n). Напряжение между линейными проводами (между началом фаз) называют *линейным* и обозначают при помощи двух индексов: U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} (рис. 6.1).

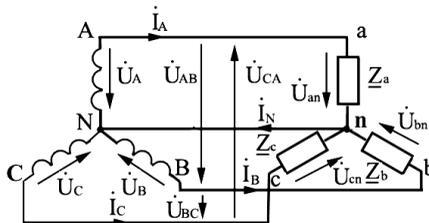


Рис. 6.1. Схема трехфазной цепи «звезда»–«звезда» с нейтральным проводом

Напряжение между нейтральной точкой и концом фазы называют *фазным*. Фазное напряжение генератора обозначают как U_A, U_B, U_C , фазное напряжение потребителя – U_a, U_b, U_c . Вся совокупность комплексного сопротивления потребителей, включенных в каждую фазу, обозначена как Z_a, Z_b, Z_c . Потребители определяют фазные токи I_a, I_b, I_c . Из схемы (см. рис. 6.1) видно, что при соединении потребителя по схеме «звезда» линейные токи равны фазным, т. е. $I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}$.

Согласно первому закону Кирхгофа $I_a + I_b + I_c = I_N$.

Сопротивления линейных проводов и нейтрального провода малы и ими можно пренебречь. Тогда линейные напряжения генератора примерно равны линейным напряжениям потребителей.

Согласно второму закону Кирхгофа

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

т. е. линейное напряжение равно векторной разности соответствующих фазных напряжений.

Для симметричного источника векторная диаграмма напряжений имеет вид как на рис. 6.2, а. Из векторной диаграммы следует, что $U_{л} = \sqrt{3} U_{\phi}$.

При анализе режима работы трехфазной цепи следует исходить из того, что трехфазный источник является симметричным. При принятом предположении о сопротивлениях линейных и нейтрального проводов система фазных напряжений потребителя при соединении «звезда» с нейтральным проводом симметрична, поэтому

$$\dot{U}_A \gg \dot{U}_a, \dot{U}_B \gg \dot{U}_b, \dot{U}_C \gg \dot{U}_c.$$

Векторная диаграмма напряжений приемника будет иметь такой же вид (рис. 6.2, б), т. е. точки нейтрали генератора и приемника совпадут и напряжение между нейтральными генератора и потребителя будет $U_{nN} = 0$.

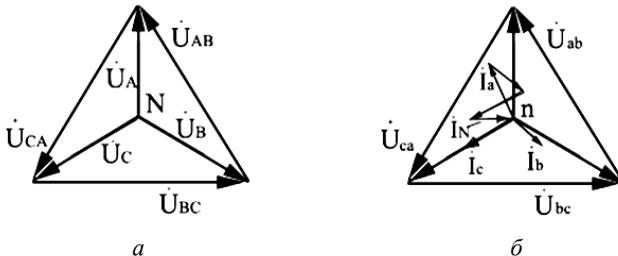


Рис. 6.2. Векторные диаграммы:

а – напряжений генератора; б – напряжений и токов потребителя

Фазные токи зависят от суммарного сопротивления всех потребителей данной фазы. По направлению они могут совпадать со своим напряжением (нагрузка чисто активная), опережать свое напряжение (нагрузка активно-емкостная) и отставать от своего напряжения (нагрузка активно-индуктивная). Векторная сумма фазных токов равна току нейтрального провода I_N (см. рис. 6.2).

Таким образом, нейтральный провод обеспечивает независимую работу потребителей в разных фазах. Например, потребители в одной из фаз можно выключить (обрыв фазы) или осуществить короткое замыкание (аварийный режим), в других двух фазах напряжение останется номинальное, т. е. то, на которое рассчитан потребитель.

Нагрузка, при которой все комплексные сопротивления фаз равны между собой ($\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C$), называется симметричной.

При симметричной нагрузке фазные токи тоже должны быть равны между собой и сдвинуты относительно друг друга по фазе на 120° . В связи с этим векторная сумма токов должна быть равна нулю, тогда необходимость нейтрального провода отпадает.

Трехфазная цепь, соединение нагрузок звездой без нейтрального провода. Несимметричный режим

В случае отключения или выхода из строя нейтрального провода при несимметричной нагрузке фазные напряжения оказываются не равны друг другу. Происходит так называемый «перекос фаз», т. к. в трехпроводной трехфазной цепи при любом режиме нагрузки векторная сумма фазных токов равна нулю:

$$\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 0.$$

При изменении сопротивления хотя бы в одной из фаз изменится величина соответствующего тока, а это приведет к изменению и остальных фазных токов согласно первому закону Кирхгофа. Согласно закону Ома ($U = IZ$) изменяются и напряжения, т. е. фазные напряжения на потребителе станут разными, отличными от номинальных. Между нейтральными точками генератора и потребителя появится напряжение, называемое напряжением смещения нейтрали \underline{U}_{nN} .

На основании второго закона Кирхгофа фазные напряжения на потребителе будут равны векторной разности соответствующих фазных напряжений генератора и напряжения смещения нейтрали:

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_{nN}; \underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_{nN}; \underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_{nN}.$$

Векторная диаграмма для случая несимметричной нагрузки при соединении потребителя по схеме «звезда» без нейтрального провода представлена на рис. 6.3.

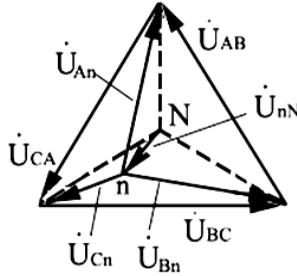


Рис. 6.3. Векторная диаграмма напряжений несимметричного режима работы цепи при соединении нагрузок звездой

Соединение потребителей по схеме «звезда» без нейтрального провода используется лишь в том случае, если трехфазная нагрузка симметрична.

Мощность в трехфазной цепи

Мощности трехфазного потребителя в общем случае можно определить как сумму мощностей всех фаз. При соединении приемников звездой активная, реактивная и полная мощности определяются по формулам

$$P = P_a + P_b + P_c = U_a I_a \cos \varphi_a + U_b I_b \cos \varphi_b + U_c I_c \cos \varphi_c ;$$

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c = U_a I_a \sin \varphi_a + U_b I_b \sin \varphi_b + U_c I_c \sin \varphi_c ;$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} .$$

При симметричной нагрузке эти формулы упрощаются:

$$P = 3P_\phi = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi = \sqrt{3}U_{л} I_{л} \cos \varphi ;$$

$$Q = 3Q_\phi = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi = \sqrt{3}U_{л} I_{л} \sin \varphi ;$$

$$S = 3S_\phi = 3U_\phi I_\phi = \sqrt{3}U_{л} I_{л} .$$

Непосредственно измерить активную мощность трехфазной нагрузки можно с помощью трех ваттметров, включенных в каждую фазу (метод трех ваттметров), или с помощью двух ваттметров, включенных по току в две фазы и использующих линейное напряжение.

Трехфазная цепь, соединенная по схеме «треугольник»

Трехфазная цепь, соединенная по схеме «треугольник», представлена на рис. 6.4.

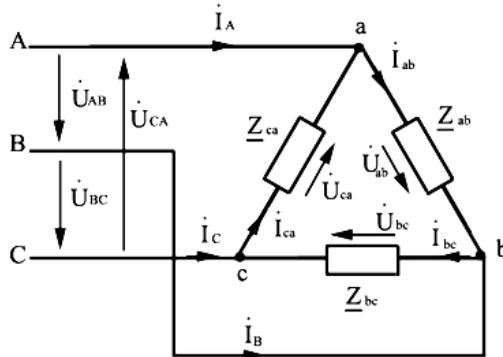


Рис. 6.4. Потребители, включенные по схеме «треугольник»

Каждая фаза потребителя присоединяется соответственно к двум линейным проводам, поэтому при соединении потребителей по схеме «треугольник» фазные напряжения равны соответствующим линейным:

$$U_{AB} = U_{ab} = U_{л};$$

$$U_{BC} = U_{bc} = U_{л} \cos(-120^\circ) + U_{л} \sin(-120^\circ);$$

$$U_{CA} = U_{ca} = U_{л} \cos 120^\circ + U_{л} \sin 120^\circ.$$

Фазные токи, которые, как и напряжения, обозначаются двойным индексом, можно определить из закона Ома для участка цепи:

$$I_{ab} = \frac{U_{ab}}{Z_{ab}}, \quad I_{bc} = \frac{U_{bc}}{Z_{bc}}, \quad I_{ca} = \frac{U_{ca}}{Z_{ca}}.$$

Токи в каждой фазе зависят только от своих линейных напряжений и сопротивлений своих фаз. На основании первого закона Кирхгофа для узлов a , b , c потребителя можно записать выражения для линейных токов

$$I_A = I_{ab} - I_{ca}; \quad I_B = I_{bc} - I_{ab}; \quad I_C = I_{ca} - I_{bc}.$$

На схеме (см. рис. 6.4) условно все линейные токи ориентированы от источника к потребителю, а все фазные – по часовой стрелке.

Допустим, сопротивления фаз разные и чисто активные ($R_{ab} \neq R_{bc} \neq R_{ca}$), поэтому фазные токи при одинаковых напряжениях будут разными. Векторная диаграмма напряжений и токов показана на рис. 6.2.

Если нагрузка симметрична, то треугольники токов становятся равносторонними с одинаковыми фазными ($I_{ab} = I_{bc} = I_{ca} = I_\phi$) и равными линейными ($I_A = I_B = I_C = I_\Delta$) токами, откуда следует, что $I_\Delta = \sqrt{3} I_\phi$.

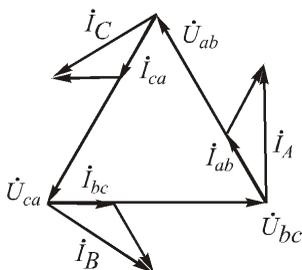


Рис. 6.5. Векторная диаграмма напряжений и токов при соединении потребителя треугольником

Задача. Определить токи в трехфазной цепи (рис. 6.4), если известны линейное напряжение $U_\Delta = 100$ В, сопротивления фаз, Ом: $Z_{AB} = 5$, $Z_{BC} = j5$, $Z_{CA} = -j5$. Построить векторные диаграммы напряжений и токов.

Индивидуальное задание

Определить токи в трехфазной цепи (рис. 6.4), если известны линейное напряжение U_Δ и сопротивления фаз Z_{AB} , Z_{BC} , Z_{CA} (см. таблицу). Построить векторные диаграммы напряжений и токов.

Таблица

Варианты индивидуального задания

Вариант	U_Δ , В	Z_{AB} , Ом	Z_{BC} , Ом	Z_{CA} , Ом	Вариант	U_Δ , В	Z_{AB} , Ом	Z_{BC} , Ом	Z_{CA} , Ом
1	220	10	20	$j10$	16	380	$-j10$	$j10$	20
2	220	10	$j10$	20	17	380	$-j10$	$-j10$	20
3	220	10	$-j10$	$j10$	18	380	$-j10$	20	$j10$

Вариант	$U_{\text{л}}, \text{В}$	$Z_{AB}, \text{Ом}$	$Z_{BC}, \text{Ом}$	$Z_{CA}, \text{Ом}$	Вариант	$U_{\text{л}}, \text{В}$	$Z_{AB}, \text{Ом}$	$Z_{BC}, \text{Ом}$	$Z_{CA}, \text{Ом}$
4	220	10	$j10$	$-j10$	19	380	$-j10$	10	$j10$
5	220	10	$-j10$	20	20	380	$-j10$	10	20
6	220	10	20	$-j10$	21	380	$-j10$	20	10
7	220	10	$j20$	$-j20$	22	380	20	10	$j10$
8	220	$j10$	$-j10$	10	23	380	20	10	$-j10$
9	220	$j10$	10	20	24	380	20	$-j10$	10
10	220	$j10$	20	10	25	380	20	$-j10$	20
11	220	$j10$	$-j10$	20	26	380	20	$j10$	$-j10$
12	220	$j10$	$j20$	10	27	380	20	$j20$	$-j20$
13	220	$j10$	10	$j20$	28	380	20	$j20$	$j20$
14	220	$j10$	$-j20$	10	29	380	$j20$	$j10$	10
15	220	$-j10$	10	20	30	380	$j20$	10	$j10$

Контрольные вопросы

1. Что называется трехфазной цепью синусоидального тока?
2. В соответствии с какими основными соотношениями фазных и линейных электрических величин потребители соединяются в трехфазных цепях по схеме «звезда» с нейтральным проводом и без нейтрального провода?
3. Чем отличается расчет трехфазной электрической цепи при симметричной и несимметричной нагрузках?
4. Каково назначение нейтрального провода? Как можно определить ток в нейтральном проводе?
5. Как связаны линейные токи и напряжения с их фазными значениями в трехфазной цепи при соединении приемников по схеме «треугольник»?
6. Как рассчитать активную, реактивную и полную мощности в трехфазных цепях синусоидального тока?

Практическое занятие № 7

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Рабочее место: аудитория.

Время проведения занятия: 90 мин.

Цель занятия: освоить методику расчета параметров силового трансформатора малой мощности для питания электронных схем.

Общие сведения

Трансформатор – статическое электромагнитное устройство, преобразующее переменное (синусоидальное) напряжение (ток) одного значения в напряжение (ток) другого значения, но той же частоты.

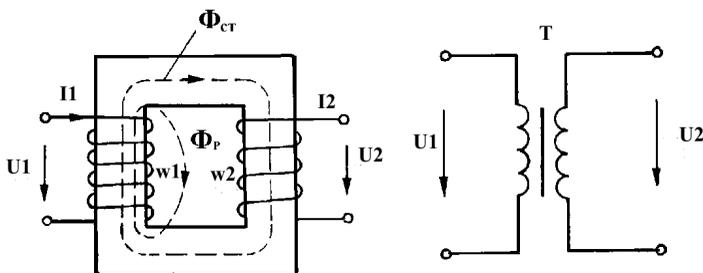


Рис. 7.1. Схема однофазного трансформатора

Простейший однофазный трансформатор конструктивно представляет собой замкнутый сердечник из пакета пластин специальной трансформаторной стали, на котором расположены магнитно связанные между собой проводниковые катушки, электрически изолированные друг от друга. Обмотка, подключенная к источнику питания, носит наименование *первичной обмотки*. Все электрические величины, связанные первичной обмоткой, называются первичными. Обмотки, соединенные с элементами нагрузки, носят наименование *вторичных обмоток* трансформатора. Работает трансформатор следующим образом: под действием переменного напряжения источника питания U_1 в первичной обмотке трансформатора возникает переменный ток I_1 , который, в свою очередь, вызывает магнитное поле вокруг первичной обмотки. Магнитные силовые линии этого поля замыкаются по стальному сердечнику, происходит пересечение магнитными силовыми линиями как первичной, так и вторичной обмотки. В первичной обмотке возникает ЭДС самоиндукции E_1 , во вторичной обмотке – ЭДС взаимной индукции E_2 .

Пример решения задачи

Задача. Рассчитать параметры трансформатора для автомобильного зарядного устройства, обеспечивающего выходное напряжение $U_2 = 12$ В и зарядный ток $I_2 = 12$ А. Напряжение сети $U_1 = 220$ В.

Решение

Определим выходную мощность трансформатора:

$$P_2 = U_2 I_2 = 12 \times 10 = 120 \text{ Вт.}$$

С учетом потерь принимаем мощность трансформатора

$$P_{\text{тр}} = 1,25 P_2 = 1,25 \times 120 = 150 \text{ Вт.}$$

Найдем минимальное сечение магнитопровода:

$$S_{\text{min}} = 1,3 \sqrt{P_{\text{тр}}} = 1,3 \sqrt{150} = 16 \text{ см}^2.$$

Из этого выражения при необходимости можно по сечению магнитопровода определить мощность трансформатора.

Сечение магнитопровода выбираем из стандартного ряда (2,9; 3,6; 4; 4,5; 5,7; 7,2; 9; 11,2; 14,4; 18; 23; 28,8 см²): $S = ab \geq S_{\text{min}}$, принимаем $S = 18 \text{ см}^2$ (рис. 7.2).

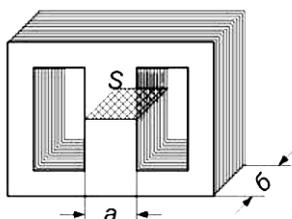


Рис. 7.2. Геометрические параметры магнитопровода

Определим число витков на 1 В:

$$w = 50 / S = 50 / 18 = 2,78 \text{ вит/В.}$$

Тогда число витков первичной обмотки

$$W_1 = w U_1 = 2,78 \times 220 = 612 \text{ витков.}$$

Число витков вторичной обмотки

$$W_2 = wU_2 = 2,78 \times 12 = 33 \text{ витка.}$$

Сечение проводов определим по формуле

$$F = \frac{I}{J},$$

где J – плотность тока, A/mm^2 .

Плотность тока принимаем равной $1,5 \dots 3 A/mm^2$, что соответствует мощности трансформатора от 1000 Вт до 10 кВт.

Сечение провода вторичной обмотки

$$F_2 = \frac{I_2}{J} = \frac{10}{2} = 5 \text{ мм}^2.$$

Определим ток первичной обмотки из выражения $U_1 I_1 \approx U_2 I_2$:

$$I_1 = \frac{U_2 I_2}{U_1} = \frac{12 \times 0}{220} = 0,55 \text{ А.}$$

Тогда сечение провода первичной обмотки

$$F_1 = \frac{I_1}{J} = \frac{0,55}{2} = 0,27 \text{ мм}^2.$$

Задачи для самостоятельного решения

Задача 7.1. Определить мощность трансформатора (гаражного щитка, блока питания музыкального центра и т. д.) по сечению сердечника (магнитопровода) (см. табл. 7.1).

Таблица 7.1

Варианты задачи 7.1 для самостоятельного решения

Вариант	$S, \text{ см}^2$	Вариант	$S, \text{ см}^2$	Вариант	$S, \text{ см}^2$
1	2	11	6,4	21	14,4
2	2,5	12	6,9	22	16
3	2,9	13	7,2	23	17,2

Окончание таблицы 7.1

Вариант	$S, \text{см}^2$	Вариант	$S, \text{см}^2$	Вариант	$S, \text{см}^2$
4	3,6	14	7,5	24	18
5	4	15	8,2	25	20
6	4,5	16	9	26	23
7	5	17	10	27	25
8	5,2	18	11,2	28	28,8
9	5,7	19	12,4	29	36
10	6	20	13	30	40

Задача 7.2. Согласно заданному варианту (табл. 7.2) определить число витков, сечение и диаметр обмоток трансформатора.

Таблица 7.2

Варианты задачи 7.2 для самостоятельного решения

Вариант	$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$I_2, \text{А}$	Вариант	$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$I_2, \text{А}$
1	127	3	3	16	220	14	4
2	127	5	2	17	220	18	4
3	127	6	2	18	220	21	4
4	127	9	1	19	220	24	5
5	127	12	1	20	220	36	4
6	127	14	3	21	380	3	5
7	127	18	3	22	380	5	4
8	127	21	3	23	380	6	3
9	127	24	10	24	380	9	2
10	127	36	5	25	380	12	2
11	220	3	4	26	380	14	1
12	220	5	3	27	380	18	2
13	220	6	2	28	380	21	2
14	220	9	1,5	29	380	24	4
15	220	12	0,8	30	380	36	6

Контрольные вопросы

1. По какому принципу работает трансформатор?
2. Как практически определить коэффициент трансформации k_t трансформатора?

3. Почему в трансформаторе обмотка низшего напряжения выполняется проводом большего сечения, чем обмотка высшего напряжения?

4. Какие типы магнитопроводов используются в электротехнических устройствах? Почему?

5. Почему при исследовании трансформатора опыт холостого хода проводят при нормальном приложенном напряжении, а опыт короткого замыкания – при нормальном первичном токе?

Практическое занятие № 8

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Рабочее место: аудитория.

Время проведения занятия: 90 мин.

Цель занятия: изучить особенности выбора трехфазного асинхронного двигателя по условиям нагрузочной способности рабочей машины.

Общие сведения

Трехфазный асинхронный двигатель (ТАД) состоит из двух основных частей – статора и ротора.

Статор – неподвижная часть двигателя состоит из станины 1, сердечника 2, обмоток 3 (рис. 8.1, а), подшипниковых щитов, закрывающих машину с торцов, и клеммной коробки, куда выводятся начала и концы обмоток и подключается питающая двигатель сеть.

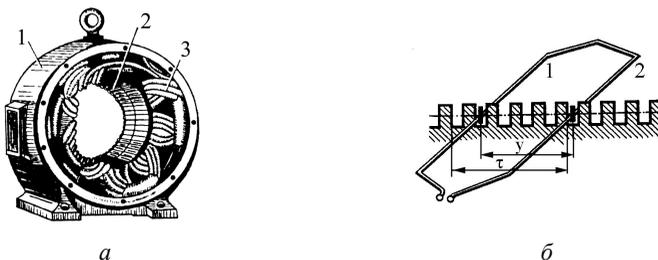


Рис. 8.1. Статор асинхронного двигателя (а) и размещение обмоток в пазах (б)

Станина выполняется литой из чугуна, стали, алюминия или сплавов легких металлов – для маломощных двигателей. Для лучшего охлаждения внешняя поверхность станины иногда делается ребристой. К станине крепятся все остальные элементы конструкции.

Для уменьшения вихревых токов сердечник статора (магнитопровод) набирается из отштампованных кольцеобразных листов электротехнической стали толщиной 0,35...0,50 мм. В машинах большой мощности листы с обеих сторон покрываются изоляционным лаком или оксидной пленкой.

В пазы сердечника укладываются обмотки статора, чаще всего выполненные из медных изолированных проводов. Число обмоток у трехфазных машин делается кратным трем, следовательно минимальное число обмоток – три. Начало и конец каждой обмотки маркируется и обозначается. Например, начала трех обмоток обозначаются буквами *A, B, C*, и они в клеммной коробке крепятся к клеммам C_1, C_2, C_3 . Концы этих обмоток *x, y, z* крепятся к клеммам C_4, C_5, C_6 соответственно.

Ротор состоит из сердечника с обмотками и вала (рис. 8.2). Вал ротора вращается в подшипниках, расположенных в подшипниковых щитах. Сердечник ротора \mathcal{Z} , как и статора, выполнен из листов электротехнической стали для уменьшения влияния на работу вихревых токов. В этих листах выполняются пазы закрытого или полузакрытого типа для размещения проводников обмотки ротора. В зависимости от конструкции обмотки ротора различают силовые асинхронные двигатели с короткозамкнутыми и фазными роторами.

У двигателя с короткозамкнутым ротором продольные проводники обмотки 2 обычно выполнены в виде стержней и на торцах замкнуты накоротко 1 (рис. 8.2), образуя простую конструкцию ротора, электрически не связанного с внешними устройствами.

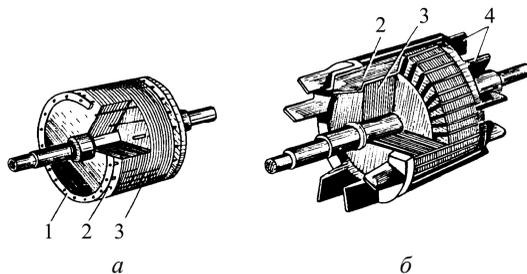


Рис. 8.2. Короткозамкнутые роторы асинхронного двигателя:
a – с медной обмоткой; *б* – с алюминиевой обмоткой

Такой ротор, предложенный М. О. Доливо-Добровольским в 1891 г., называется беличьей клеткой, или беличьим колесом. Обмотка ротора и короткозамыкающие кольца выполняются из меди или алюминия.

Работа асинхронного двигателя

При включении обмоток статора в трехфазную сеть появляется вращающееся магнитное поле статора, под влиянием которого приводится во вращение ротор.

Принцип получения вращающегося магнитного поля (ВМП) с помощью неподвижной системы проводников заключается в том, что по проводникам обмоток статора, геометрически сдвинутым на 120° , протекают токи, сдвинутые по фазе относительно друг друга на углы 120° . В результате магнитное поле в статоре постоянно по величине и вращается с постоянной частотой.

Пусть в каждой фазной обмотке одна катушка, а в катушке – один виток. В этом случае в паз будет уложено по одному проводнику. Входной проводник фазы A будет уложен в паз A , а выходной проводник – в паз x (рис. 8.3). Входной проводник по фазе B будет сдвинут относительно A на угол 120° , а проводник третьей фазы C – на 240° .

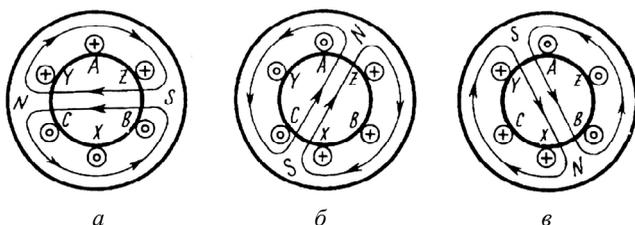


Рис. 8.3. Двухполюсное вращающееся магнитное поле для моментов времени t_1 (а), t_2 (б), t_3 (в)

Функции тока для каждой из фаз показаны на рис. 8.4.

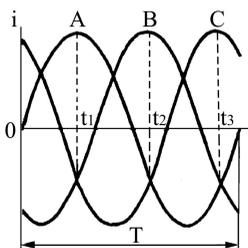


Рис. 8.4. Трехфазная система токов

В момент времени t_1 ток в фазе A положительный и максимальный. Условно примем, что такой ток по проводнику A течет от нас (обозначим это крестиком), а ток по проводнику X – на нас (обозначим это окружностью). По фазам B и C в момент времени t_1 токи будут отрицательны, поэтому в начале обмоток в пазах B и C токи будут ориентированы на нас (окружность), а в конце обмоток в пазах Y и Z – от нас (крестик). Как видно из рис. 8.3, a , три проводника имеют одинаковую ориентацию токов, поэтому их магнитные поля объединяются и образуют двухполюсную систему.

Через $1/3$ периода трехфазных синусоидальных токов (рис. 8.4) в момент времени t_2 максимальным и положительным станет ток в фазе B , а в фазе A ток станет отрицательным. В фазе C ток, как и в момент времени t_1 , останется отрицательным. Поэтому в проводниках A , X , B , Y токи изменят свое направление, а в проводниках C и Z – нет. Отразив это соответствующей символикой, получим результирующее магнитное поле, повернутое на угол 120° по часовой стрелке (рис. 8.3, a). Еще через $1/3$ периода, в момент времени t_3 , положительным и максимальным будет ток в фазе C , а отрицательными – токи в фазах A и B . Рассуждая аналогично предыдущим случаям, получим результирующее магнитное поле, повернутое еще на 120° (рис. 8.3, b , $в$). Таким образом, за период синусоидального тока ВМП совершит один оборот.

Если увеличить число катушек в каждой из обмоток и соединить их последовательно, то скорость ВМП будет уменьшаться. Таким образом, скорость вращения ВМП, об/мин, прямо пропорциональна частоте питающей сети f и обратно пропорциональна числу пар полюсов (числу последовательно соединенных катушек каждой обмотки p):

$$n_1 = \frac{60f}{p} .$$

Максимальная частота вращения ВМП наблюдается при $p = 1$, т. е. $n_{1\max} = 60f$ об/мин. Для питающей сети, в которой $f = 50$ Гц, $n_{1\max} = 3000$ об/мин.

Направление вращения ВМП определяется порядком следования фаз. При прямой последовательности фаз $A-B-C$ магнитное поле вращается по часовой стрелке. При обратной, например $B-A-C$, – против часовой стрелки.

ВМП статора пересекает проводники обмоток ротора и по закону электромагнитной индукции наводит в них ЭДС взаимной индукции, которая определяется по формуле

$$E = Blv,$$

где B – магнитная индукция поля статора;

l – длина проводника ротора;

v – скорость пересечения проводника ротора магнитными линиями.

ЭДС возникает в замкнутой обмотке, поэтому по ней потечет ток ротора. Следовательно, на обмотку начнет действовать сила, которая определяется по закону Ампера:

$$F_1 = BI_2,$$

где I_2 – сила тока, протекающего по проводнику ротора.

Направление этой силы совпадает с направлением вращения магнитного поля, а под действием пары сил появляется момент вращения ротора

$$M_{BP} = 2F_1 N_2 \frac{D}{2},$$

где D – диаметр ротора;

N_2 – число проводников ротора.

Под действием момента сил ротор двигателя разгоняется до некоторой скорости вращения n_2 , которая всегда принципиально меньше скорости вращения магнитного поля статора n_1 . Если допустить, что $n_1 = n_2$, то магнитное поле статора не будет пересекать проводники ротора и момент станет равным нулю. У двигателя принципиально $n_1 > n_2$, поэтому такие электрические машины называются асинхронными (несинхронными) и их работа определяется параметром s – скольжением:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}.$$

Отсюда частота вращения ротора

$$n_2 = n_1(1 - s) = \frac{60f}{p}(1 - s).$$

Регулировка скорости вращения ТАД

Исходя из приведенной формулы частоту вращения двигателя можно регулировать следующими способами:

1) изменением частоты питающей сети f , например с помощью преобразователей частоты;

2) изменением числа пар полюсов p , что можно осуществить коммутационным методом, переключением катушек фазных обмоток с последовательного соединения на параллельное и наоборот;

3) изменением скольжения s , что осуществимо в двигателях с фазным ротором (изменением сопротивлений реостатов), а при короткозамкнутом роторе изменением питающего напряжения U_1 .

Все три способа требуют дополнительных затрат, что является существенным недостатком асинхронных двигателей.

Рабочие характеристики двигателя

Свойства двигателя в рабочем режиме определяются рабочими характеристиками. Рабочие характеристики представляют собой зависимости потребляемой мощности P_1 , потребляемого тока I_1 , коэффициента мощности $\cos \varphi_1$, коэффициента полезного действия (КПД) η , момента вращения $M_{вр}$, частоты вращения n_2 , скольжения s от полезной мощности на валу двигателя P_2 при номинальном напряжении U_1 и постоянной частоте f питающей сети.

Мощность и КПД асинхронного двигателя

Исходя из законов механики полезная механическая мощность, Вт:

$$P_2 = \omega_2 M,$$

где $\omega_2 = \frac{2\pi n_2}{60}$ – угловая скорость вращения, рад/с.

Активная потребляемая мощность P_1 на холостом ходу мала и расходуется на покрытие потерь механических и в магнито-

проводе. Коэффициент мощности двигателя определяется как отношение активной мощности к полной:

$$\cos j_1 = \frac{P_1}{S_1} = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}},$$

где S_1 , P_1 , Q_1 – полная, активная и реактивная мощности двигателя.

КПД определяется отношением полезной мощности (механической мощности на валу двигателя) P_2 к затраченной, т. е. потребляемой из сети P_1 :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\omega_2 M}{\sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi_1},$$

где U_1 , I_1 – линейные напряжение и ток;

j_1 – угол сдвига фаз между линейными напряжением и током.

Механическая характеристика двигателя

Механической характеристикой двигателя называется зависимость частоты вращения от момента нагрузки на валу при постоянных значениях напряжения U_1 и частоты питающей сети f :

$$n_2 = f(M).$$

Механическая характеристика является обратной зависимостью по отношению к зависимости момента вращения от скольжения, показанной на рис. 8.5, а.

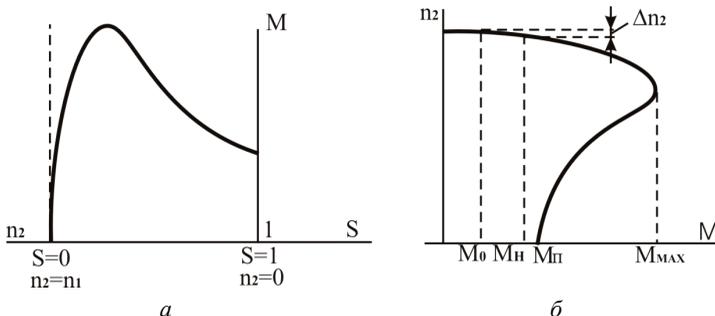


Рис. 8.5. Механическая характеристика трехфазного асинхронного двигателя

При изменении момента нагрузки на валу от нуля до номинального значения ($0 < M < M_n$) скорость вращения изменяется лишь на несколько процентов от скорости вращения ВМП. Такая механическая характеристика считается жесткой. Это обусловлено тем, что скольжение s на холостом ходу двигателя около 1 %, а в номинальном режиме – 4–8 %.

Пример решения задачи

Задача. Паспортная мощность рабочей машины составляет $P_{рм} = 3,7$ кВт. Приводной вал вращается с установившейся частотой вращения $n_{рм} = 1360$ об/мин. Напряжение питающей сети 380 В. Необходимо выбрать трехфазный асинхронный двигатель серии АИР, достаточный для привода данной машины. В каком режиме будет работать данная машина с выбранным двигателем? В каком режиме будет проходить пуск данного двигателя?

Решение

1. Выбираем из прилож. 1 тип двигателя, удовлетворяющий требованиям $P_{2ном} > P_{рм}$, $n_2 > n_{рм}$. Предположительно этим условиям удовлетворяет АИР100L4, для которого $P_{2ном} = 4,0$ кВт, $s_{ном} = 5,3$ %, КПД = 84,0 %, $\cos\varphi = 0,84$, $\lambda = M_{max} / M_n = 2,2$.

2. Определяем момент рабочей машины:

$$M_{рм} = 9,55 \frac{P_{рм}}{n_{рм}} = 9,55 \frac{3700}{1360} = 25,98 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

3. Для построения необходимо произвести расчет номинального момента и скольжения:

$$M_n = 9,55 \frac{P_{2ном}}{n_{2ном}} = 9,55 \frac{4000}{1431} = 26,7 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

4. Рассчитаем критическое скольжение и критический момент:

$$s_k = s_{ном} \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right) = 0,22;$$

$$M_{кр} = \lambda M_{ном} = 26,7 \times 2,2 = 58,48 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Основных точек характеристики для ее построения недостаточно. С помощью упрощенной формулы Клосса необходимо рассчитать моменты для других значений скольжения

$$M = \frac{2M_{\text{кр}}}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}},$$

а также частоту вращения вала двигателя для этих моментов

$$n_2 = \frac{60f}{p}(1 - s).$$

Сведем результаты расчета в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Точки механической характеристики трехфазного асинхронного двигателя

s	0	$s_{\text{ном}}$	$s_{\text{кр}}$	0,2	$\frac{s_{\text{кр}}}{2}$	0,3	0,4
M , Н·м	0	26,6	46,78	58,48	58,21	55,77	49,38
n_2 , об/мин	1500	1420,5	1335	1170	1200	1050	900

Окончание таблицы 8.1

s	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	
M , Н·м	43,11	37,80	33,45	29,90	26,97	24,54	
n_2 , об/мин	750	600	450	300	150	0	

В соответствии с данными табл. 8.1 построим график механической характеристики двигателя (рис. 8.6). На графике механической характеристики двигателя отметим точку рабочей машины с координатами $M_{\text{рм}} = 25,98$ Н·м, $n_{\text{рм}} = 1360$ об/мин.

Если точка рабочей машины попадает в зону, ограниченную снизу линией $n_{2\text{max}}$, а сверху – самой механической характеристикой, то двигатель можно использовать для привода данной рабочей машины. Если точка рабочей машины попадает в зону 1, то данный двигатель с данной рабочей машиной может работать в длительных безостановочных режимах (режим S1), если же в зону 2, то в краткосрочном режиме (режим S2).

Если перпендикуляр, опущенный из точки рабочей машины на ось момента, пересекает эту ось левее точки пуска, то данный двигатель может запустить рабочую машину под нагрузкой. Если же перпендикуляр пересекает ось момента в точке пуска или правее, то пуск рабочей машины следует осуществлять на холостом ходу и только после этого нагружать ее.

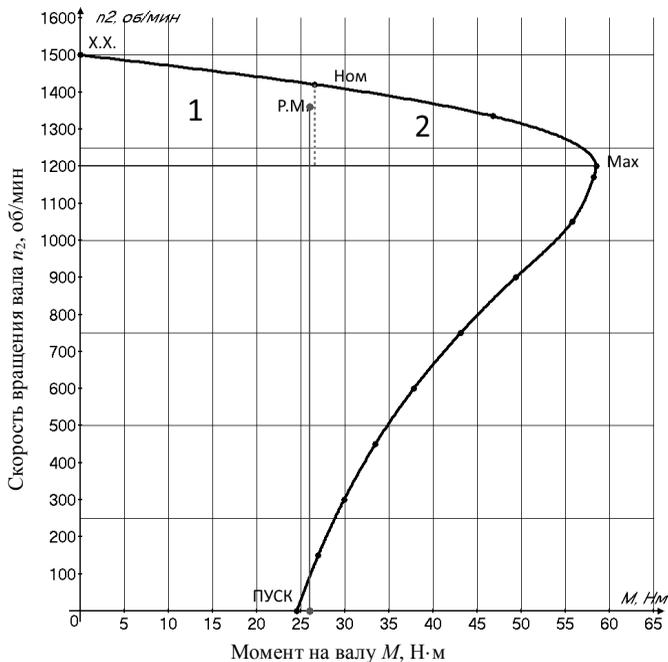


Рис. 8.7. Механическая характеристика

В данном случае двигатель может работать с рабочей машиной в длительных безостановочных режимах, но запускать его в работу необходимо на холостом ходу.

Задание для самостоятельного выполнения

Даны паспортная мощность и номинальная скорость вращения вала рабочей машины. Напряжение питающей сети – 380 В. Необходимо выбрать трехфазный асинхронный двигатель серии АИР

(прилож. 1), достаточный для привода данной машины. В каком режиме будет работать данная машина с выбранным двигателем? В каком режиме будет проходить пуск данного двигателя?

Таблица 8.2

Варианты задания для самостоятельного выполнения

Номер варианта	$P_{\text{зад}}$, кВт	n_2 , об/мин	Номер варианта	$P_{\text{зад}}$, кВт	n_2 , об/мин
1	0,23	1380	16	0,085	1371
2	0,175	885	17	28	588
3	0,08	2742	18	16,3	2937
4	0,25	654	19	7	731
5	0,05	1378	20	45	589
6	1	697	21	20,9	2943
7	0,29	908	22	0,99	1419
8	0,23	2775	23	15	730
9	0,33	1365	24	0,7	2823
10	0,75	916	25	7	968
11	0,16	1366	26	18	732
12	2,85	706	27	2	1423
13	1,45	936	28	3,8	949
14	5,1	2898	29	18	976
15	0,45	1390	30	2,8	2871

Контрольные вопросы

1. Как изменяется величина скорости холостого хода при изменении величины питающего напряжения и сопротивления обмотки статора?

2. Как изменяется величина момента пуска и критического момента при изменении величины питающего напряжения и сопротивления обмотки статора?

3. Как изменяется рабочий участок при изменении величины питающего напряжения и сопротивления обмотки статора?

4. Что общего у графиков механической характеристики, построенных с учетом параметров схемы замещения и формулы Клосса? Чем они отличаются?

Практическое занятие № 9

ОСНОВЫ ВЫБОРА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО ТРЕБОВАНИЯМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Рабочее место: аудитория.

Время проведения занятия: 90 мин.

Цель занятия: научиться работать с полупроводниковыми приборами, определять их маркировку по справочным данным, производить простейшие расчеты.

Общие сведения

Диод – это полупроводниковый прибор с одним *p-n* переходом, имеющий два вывода (анод и катод), и предназначенный для выпрямления, детектирования, стабилизации, модуляции, ограничения и преобразования электрических сигналов.

Систему условных обозначений современных типов диодов устанавливает ГОСТ 10862–73. В основу системы обозначений положен буквенно-цифровой код.

Первый элемент обозначает исходный полупроводниковый материал, из которого изготовлен диод:

Г или 1 – для германия или его соединений;

К или 2 – для кремния или его соединений;

А или 3 – для соединений галлия;

И или 4 – для соединений индия.

Второй элемент – буква, определяющая подкласс (или группу) прибора:

Д – для диодов выпрямительных, импульсных, магнитодиодов, термодиодов;

Ц – выпрямительные столбы и блоки;

А – диоды СВЧ;

В – варикапы;

И – туннельные и обращенные диоды;

Н – диодные тиристоры;

У – триодные тиристоры;

Л – излучатели (светодиоды);

Г – генераторы шума;

- Б – диоды Ганна;
- К – стабилизаторы тока;
- С – стабилитроны и стабисторы.

Третий элемент состоит из трех цифр, обозначающих назначение, качественные свойства приборов, порядковый номер разработки.

Четвертый элемент (буква) обозначает классификацию диода внутри технологического типа по одному или нескольким электрическим параметрам. В ряде случаев классифицирование может осуществляться только с помощью третьего элемента, при этом приборам одного типа, но с различными классификационными параметрами даются разные трехзначные номера в пределах соответствующей сотни.

Основные параметры полупроводникового диода:

- средний прямой ток $I_{пр. ср}$ – максимально допустимая величина среднего (за период) значения прямого тока, длительно протекающего через диод. Существенно зависит от температуры и понижается с ее ростом;

- импульсный прямой ток $I_{пр. и}$ – максимально допустимая амплитуда импульса прямого тока. В обязательном порядке учитывается при работе диода на активно-емкостную нагрузку;

- максимально допустимое обратное напряжение $U_{обр. макс}$ – амплитудное значение обратного напряжения на диоде, при превышении которого может наступить электрический пробой.

Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода

Зависимость тока, проходящего через *p-n* переход, от величины и полярности приложенного к нему напряжения изображают в виде кривой, называемой *вольт-амперной характеристикой диода* (рис. 9.1).

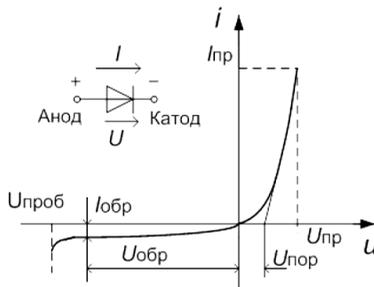


Рис. 9.1. Вольт-амперная характеристика диода

Вольт-амперная характеристика состоит из двух ветвей: прямая ветвь в правой верхней части соответствует прямому (пропускному) току через диод, а обратная ветвь в левой нижней части соответствует обратному (закрытому) току через диод.

Прямая ветвь идет круто вверх, прижимаясь к вертикальной оси, и характеризует быстрый рост прямого тока через диод с увеличением прямого напряжения.

Обратная ветвь идет почти параллельно горизонтальной оси и характеризует медленный рост обратного тока. Чем круче к вертикальной оси прямая ветвь и чем ближе к горизонтальной обратная ветвь, тем лучше выпрямительные свойства диода.

Наличие небольшого обратного тока является недостатком диодов. Из кривой вольт-амперной характеристики видно, что прямой ток диода $I_{пр}$ в сотни раз больше обратного тока $I_{обр}$.

Задачи для самостоятельного решения

Задача 9.1. Рассчитать простейшую схему выпрямителя без сглаживающего фильтра для выпрямления синусоидального напряжения с действующим значением $U = 500$ В, используя диоды согласно своему варианту в таблице.

Таблица

Варианты задачи 9.1 для самостоятельного решения

Номер варианта	Тип диода	$U_{обр. макс}$, В	$I_{обр. макс}$, мА	$I_{выпр. макс}$, А	$U_{пр. ср}$, В	k_n	k_T
1	Д 229 А	200	0,05	0,4	1	0,5	0,8
2	Д 229 Б	400	0,05	0,4	1	0,6	0,7
3	Д 229 В	100	0,2	0,4	1	0,5	0,6
4	Д 229 Г	200	0,2	0,4	1	0,7	0,8
5	Д 229 Д	300	0,2	0,4	1	0,8	0,5
6	Д 202	100	0,5	0,4	1	0,8	0,7
7	Д 207	200	0,05	0,1	1	0,8	0,6
8	Д 208	300	0,05	0,1	1	0,8	0,8
9	Д 214 А	100	3	5	1	0,5	0,7
10	Д 215 А	200	3	5	1	0,5	0,5
11	Д 226 А	300	0,05	0,3	1	0,6	0,8
12	Д 7 Г	300	0,1	0,3	0,5	0,6	0,5
13	Д 226 В	300	0,05	0,3	1	0,6	0,6

Номер варианта	Тип диода	$U_{\text{обр. макс. В}}$	$I_{\text{обр. макс. МА}}$	$I_{\text{выпр. макс. А}}$	$U_{\text{пр. ср. В}}$	$k_{\text{н}}$	$k_{\text{т}}$
14	Д 226 Г	200	0,05	0,3	1	0,7	0,7
15	Д 226 Б	300	0,3	0,3	1	0,5	0,7
16	Д 226 Е	200	0,05	0,3	1	0,7	0,5
17	Д 242	100	3	10	1,25	0,6	0,5
18	Д 243	200	3	10	1,25	0,8	0,7
19	Д 245	300	3	10	1,25	0,6	0,7
20	Д 302	200	0,8	1	0,3	0,5	0,6
21	КД 102	250	0,01	0,1	1,2	0,8	0,8
22	КД 205 В	300	0,2	0,5	1	0,6	0,7
23	Д 204	300	0,5	0,4	1	0,7	0,5
24	Д 205	400	0,5	0,4	1	0,8	0,5
25	Д 226 В	300	0,05	0,3	1	0,5	0,7
26	Д 7 Е	350	0,1	0,3	0,5	0,5	0,8
27	Д 209	400	0,1	0,1	1	0,5	0,6
28	Д 232 А	400	3	10	1	0,7	0,5
29	Д 232 Б	400	3	5	1,5	0,8	0,7
30	Д 245 А	300	3	10	1	0,6	0,8

Задача 9.2. Рассчитать простейшую схему выпрямителя без сглаживающего фильтра для выпрямления синусоидального напряжения с действующим значением $U = 500$ В, используя диоды согласно своему варианту.

Методические указания к решению

1. Определить амплитудное значение синусоидального напряжения:

$$U_m = \sqrt{2}U.$$

2. Определить необходимое число диодов:

$$n = \frac{U_m}{k_{\text{н}} U_{\text{обр. макс}}}.$$

Внимание! Полученное число n округлять до большего значения.

3. Определить значения сопротивлений шунтирующих резисторов:

$$R_{\text{Ш}n} \leq \frac{nU_{\text{обр. макс}} - 1,1U_m}{(n - 1)I_{\text{обр. макс}}}.$$

4. Согласно расчетам привести схему выпрямителя (рис. 9.2).

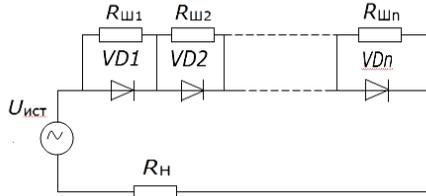


Рис. 9.2. Примерная схема выпрямительного устройства к задаче 9.1

Задача 9.3. Составить и рассчитать выпрямительную цепь, позволяющую получить выпрямленный ток $I_{\text{выпр}} = 400 \text{ мА}$, если используются заданные в таблице диоды.

Методические указания к решению

1. Определите требуемое число диодов:

$$n = \frac{I_{\text{выпр}}}{k_m I_{\text{выпр. макс}}}.$$

2. Определить значения добавочных сопротивлений:

$$R_{\text{Доб}} \geq \frac{U_{\text{пр. ср}} (n - 1)}{nI_{\text{выпр. макс}} - 1,1I_{\text{выпр}}}.$$

3. Согласно расчетам привести схему выпрямителя (см. рис. 9.2).

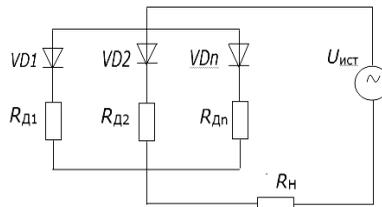


Рис. 9.3. Примерная схема выпрямительного устройства к задаче 9.2

Контрольные вопросы

1. Чем отличаются полупроводниковые диоды на основе p - n -переходов и на основе переходов «металл–полупроводник»?
2. Как зависят вольт-амперные характеристики полупроводниковых диодов на основе кремния от температуры окружающей среды?
3. Какие существуют виды выпрямителей на основе полупроводниковых диодов?
4. Каковы преимущества выпрямителей, построенных на основе диодов с переходами «металл–полупроводник»?

Практическое занятие № 10

ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И КОМБИНАЦИОННЫЕ УСТРОЙСТВА. ОСНОВЫ БУЛЕВОЙ АЛГЕБРЫ

Рабочее место: аудитория.

Время проведения занятия: 90 мин.

Цель занятия: изучить принцип построения логических операций и их математическую запись средствами булевой алгебры.

Общие сведения

В ЭВМ, цифровых измерительных приборах и других цифровых устройствах широко применяются логические элементы (ЛЭ). Каждый ЛЭ выполняет определенную логическую операцию над цифровой информацией. ЛЭ создают на базе электронных устройств, работающих в ключевом режиме. Ключевой режим характеризуется двумя состояниями ключа: включено и отключено. Поэтому любую информацию необходимо преобразовать в цифровой двоичный код, при котором цифра каждого разряда принимает только два значения: «0» (логический ноль) и «1» (логическая единица).

Для описания логических операций используется математический аппарат, получивший название алгебры логики, или булевой алгебры – в честь его создателя, ирландского ученого Джорджа Буля.

Алгебра логики изучает взаимосвязь между простыми высказываниями, образующими сложные. Исходя из булевой алгебры, простое высказывание может иметь только два значения – истинное (*true*) или ложное (*false*). Одно из этих значений принимается за единицу, второе – за нуль. Уровень выходного напряжения ЛЭ зависит от уровня входного напряжения (или нескольких входных). Эта связь отражена в формуле и таблице состояний, или таблице истинности.

Логические операции по определенным правилам преобразуют входную информацию, обозначаемую символами $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$, в выходную, которую обозначим буквой F . Условные обозначения основных логических элементов приведены на рис. 10.1, таблица истинности представлена в виде табл. 10.1 для двух значений входных сигналов – X_1 и X_2 .

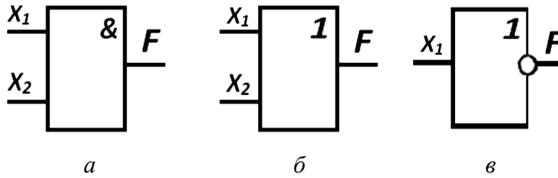


Рис. 10.1. Графические обозначения основных логических элементов (операций):
 а – элемент «И»; б – элемент «ИЛИ»; в – элемент «НЕ»

Таблица 10.1

Таблица истинности простейших логических элементов

X_1	X_2	F			
		«И»	«ИЛИ»	«2И-НЕ»	«2ИЛИ-НЕ»
0	0	0	0	1	1
0	1	0	1	1	0
1	0	0	1	1	0
1	1	1	1	0	0

Основные логические операции:

1. *Логическое умножение (конъюнкция)*, или операция «И» (рис. 10.1, а), обозначается в формулах булевой алгебры знаком «*». Символически операция записывается выражением

$$F = X_1 * X_2 * X_3 * \dots * X_n.$$

На выходе ЛЭ сигнал «1» (*true*) будет только в том случае, если на X_1 , X_2 , X_3 и т. д. входы, предусмотренные в данной операции, поступят все сигналы *true*. Ложное высказывание будет истинным, если истинны все простые высказывания.

2. *Логическое сложение (дизъюнкция)*, она же операция «ИЛИ» (рис. 10.1, б), обозначается знаком «+»:

$$F = X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n.$$

На выходе ЛЭ «ИЛИ» сигнал «1» будет в том случае, если на его входы X_1 , или X_2 , или X_3 и т. д. поступит хотя бы один сигнал «1» из всех предусмотренных. Другими словами, сложное высказывание будет истинным (*true*), если истинно хотя бы одно из простых высказываний, и ложным (*false*), если ложны все простые высказывания.

3. *Логическое отрицание (инверсия)*, или «НЕ», обозначается чертой над входной переменной (входными переменными):

$$F = \overline{X}.$$

На схемах условное обозначение этой логической операции – кружок на выходе прямоугольника (рис. 10.1, в). На выходе ЛЭ сигнал будет лишь в том случае, если на входе сигнала нет. Если на входе сигнал есть, то на выходе он отсутствует. Это простое отрицание, которое используется сравнительно редко.

Гораздо чаще используется операция «НЕ» в сочетании с операциями «И» или «ИЛИ». Рассмотрим такие составные операции.

4. *Отрицание логического умножения*, или операция «И-НЕ», известна также под названием «штрих Шеффера» (рис. 10.2, а):

$$F = \overline{X_1 * X_2 * X_3 * \dots * X_n}.$$

Сигнал на выходе ЛЭ будет в том случае, если отсутствует сигнал хотя бы на одном входе. Эта операция образует сложное высказывание из простых по следующему правилу: сложное высказывание истинно, если ложно хотя бы одно из простых высказываний, и ложно, если все простые высказывания истинны (см. табл. 10.1).

На входы ЛЭ при любой логической операции подается определенное количество входных сигналов, поэтому это находит отражение

и в символической записи. Например, если на входы подаются два сигнала, то получим запись «2И-НЕ», если три сигнала, то «3И-НЕ»:

$$F = \overline{X_1 * X_2}, F = F = \overline{X_1 * X_2 * X_3}.$$

5. *Отрицание логического сложения*, или операция «ИЛИ-НЕ», также называется «стрелкой Пирса» (рис. 10.2, б):

$$F = \overline{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}.$$

На выходе устройства сигнал будет лишь в том случае, если нет сигналов на его входах. Если появится сигнал хотя бы на одном входе ЛЭ, реализующего операцию «ИЛИ-НЕ», то на выходе сигнала не будет. Операция «ИЛИ-НЕ» образует сложное высказывание из простых в соответствии со следующим правилом: сложное высказывание истинно лишь в том случае, когда ложны все образующие его простые высказывания, и ложно, если истинно хотя бы одно из простых высказываний (см. табл. 10.1).

Символьная запись выглядит как «2ИЛИ-НЕ», если на входы подаются два сигнала, и как «3ИЛИ-НЕ», если три сигнала:

$$F = \overline{X_1 + X_2}, F = F = \overline{X_1 + X_2 + X_3}.$$

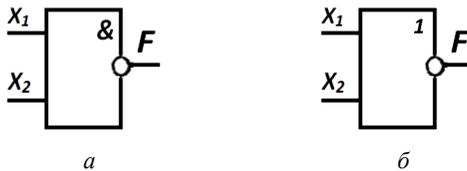
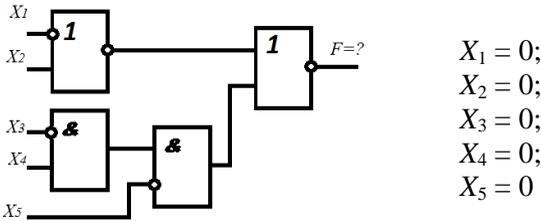


Рис. 10.2. Графические обозначения составных логических элементов (операций): а – элемент «И-НЕ»; б – элемент «ИЛИ-НЕ»

В зависимости от вида используемых сигналов ЛЭ подразделяют на потенциальные, в которых сигналы «0» (*false*) и «1» (*true*) задаются двумя различными уровнями постоянного напряжения. Низкому уровню напряжения соответствует «0», высокому – «1». Также ЛЭ бывают импульсными, в которых «0» означает отсутствие импульса, а «1» – его наличие. Наибольшее распространение получили потенциальные ЛЭ.

Примеры решения задач

Задача 10.1. По схеме комбинационного устройства и комбинации входных сигналов определить общий выходной сигнал. Записать формулу срабатывания комбинационного устройства.



Общий выходной сигнал $F = 1$.

Формула срабатывания:

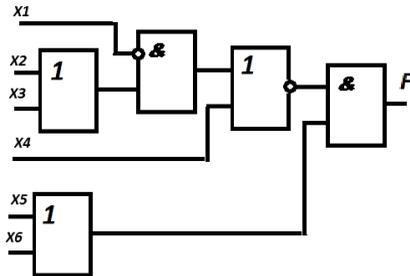
$$F = \overline{\overline{X_1 + X_2}} + ((\overline{X_3} * X_4) * X_5) \cdot \overline{\emptyset}$$

Задача 10.2. Восстановить схему комбинационного устройства по формуле его срабатывания

$$F = \overline{\overline{(\overline{X_1} * (X_2 + X_3)) + X_4}} * (X_5 + X_6) \cdot \overline{\emptyset}$$

Определить выходной сигнал устройства по комбинации входных:
 $X_1 = 0; X_2 = 1; X_3 = 1; X_4 = 0; X_5 = 1; X_6 = 0$.

Схема комбинационного устройства:



Выходной сигнал устройства $F = 0$.

Задача для самостоятельного решения

Восстановить схему комбинационного устройства по формуле его срабатывания. Определить выходной сигнал устройства по комбинации входных.

Таблица 10.2

Варианты задачи для самостоятельного решения

Вариант	Исходные данные
1	$F = \overline{\overline{\overline{X_1 * (X_2 + X_3)} + X_4}} * \overline{\overline{X_5 + X_6}}$ $X_1 = 0; X_2 = 1; X_3 = 1; X_4 = 0; X_5 = 1; X_6 = 0$
2	$F = \overline{\overline{\overline{\overline{X_1 * X_2} + X_3} + X_4} * \overline{\overline{X_5 + X_6}}}$ $X_1 = 0; X_2 = 1; X_3 = 1; X_4 = 0; X_5 = 1; X_6 = 0$
3	$F = \overline{\overline{\overline{\overline{X_1 + X_2} + X_3} * \overline{\overline{X_4 * (X_5 * X_6)}}}}$ $X_1 = 0; X_2 = 0; X_3 = 1; X_4 = 1; X_5 = 0; X_6 = 1$
4	$F = \overline{\overline{\overline{\overline{X_1 + X_2} + X_3} + X_4} * \overline{\overline{X_5 + X_6}}}$ $X_1 = 1; X_2 = 1; X_3 = 0; X_4 = 0; X_5 = 1; X_6 = 0$
5	$F = \overline{\overline{\overline{\overline{X_1 * X_2} + (X_3 * X_4)} * \overline{X_5} + X_6}}$ $X_1 = 0; X_2 = 0; X_3 = 1; X_4 = 0; X_5 = 0; X_6 = 1$
6	$F = \overline{\overline{\overline{\overline{X_1 * X_2} + X_3} * \overline{\overline{X_4 + (X_5 * X_6)}}}}$ $X_1 = 0; X_2 = 0; X_3 = 1; X_4 = 0; X_5 = 0; X_6 = 1$
7	$F = \overline{\overline{\overline{\overline{X_1 * X_2} * (X_3 + X_4)} * \overline{X_5} + X_6}}$ $X_1 = 0; X_2 = 0; X_3 = 1; X_4 = 1; X_5 = 0; X_6 = 1$
8	$F = \overline{\overline{\overline{\overline{X_1 + X_2} + X_3} * \overline{\overline{X_4 * (X_5 + X_6)}}}}$ $X_1 = 0; X_2 = 0; X_3 = 0; X_4 = 1; X_5 = 0; X_6 = 1$
9	$F = \overline{\overline{\overline{\overline{X_1 * (X_2 + X_3)} + X_4} * \overline{\overline{X_5 + X_6}}}}$ $X_1 = 0; X_2 = 1; X_3 = 1; X_4 = 0; X_5 = 1; X_6 = 0$

Вариант	Исходные данные
10	$F = \overline{\overline{\overline{\overline{X_1 * X_2}} * X_3}} + \overline{\overline{\overline{X_4 * (X_5 * X_6)}}}$ $X_1 = 0; X_2 = 1; X_3 = 1; X_4 = 1; X_5 = 0; X_6 = 0$
11	$F = \overline{\overline{\overline{\overline{X_1 * X_2}} + X_3}} + X_4 \overline{\overline{\overline{X_5 * X_6}}}$ $X_1 = 1; X_2 = 1; X_3 = 0; X_4 = 0; X_5 = 1; X_6 = 0$
12	$F = \overline{\overline{\overline{\overline{X_1 * X_2}} * X_3}} * \overline{\overline{\overline{X_4 * (X_5 * X_6)}}}$ $X_1 = 0; X_2 = 0; X_3 = 1; X_4 = 1; X_5 = 0; X_6 = 1$
13	$F = \overline{\overline{\overline{\overline{X_1 + X_2}} + X_3}} * \overline{\overline{\overline{X_4 + (X_5 + X_6)}}}$ $X_1 = 0; X_2 = 0; X_3 = 1; X_4 = 1; X_5 = 0; X_6 = 1$
14	$F = \overline{\overline{\overline{\overline{((X_1 + X_2) + X_3)} + \overline{\overline{X_4 * (X_5 + X_6)}}}}}$ $X_1 = 0; X_2 = 0; X_3 = 1; X_4 = 0; X_5 = 0; X_6 = 1$
15	$F = \overline{\overline{\overline{\overline{((X_1 + X_2) + X_3)} * \overline{\overline{X_4 * (X_5 * X_6)}}}}}$ $X_1 = 0; X_2 = 0; X_3 = 1; X_4 = 0; X_5 = 0; X_6 = 1$
16	$F = \overline{\overline{\overline{\overline{X_1 * X_2}} + X_3}} * \overline{\overline{\overline{X_4 + (X_5 * X_6)}}}$ $X_1 = 0; X_2 = 0; X_3 = 1; X_4 = 1; X_5 = 0; X_6 = 1$
17	$F = \overline{\overline{\overline{\overline{X_1 * X_2}} + X_3}} * \overline{\overline{\overline{X_4 * (X_5 * X_6)}}}$ $X_1 = 1; X_2 = 0; X_3 = 1; X_4 = 1; X_5 = 0; X_6 = 0$
18	$F = \overline{\overline{\overline{\overline{X_1 * X_2}} + X_3}} + X_4 \overline{\overline{\overline{X_5 * X_6}}}$ $X_1 = 0; X_2 = 1; X_3 = 1; X_4 = 1; X_5 = 1; X_6 = 0$
19	$F = \overline{\overline{\overline{\overline{X_1 * X_2}} + X_3}} + X_4 \overline{\overline{\overline{X_5 + X_6}}}$ $X_1 = 1; X_2 = 1; X_3 = 0; X_4 = 0; X_5 = 1; X_6 = 0$
20	$F = \overline{\overline{\overline{\overline{X_1 * X_2}} * X_3}} * \overline{\overline{\overline{X_4 * (X_5 * X_6)}}}$ $X_1 = 0; X_2 = 0; X_3 = 1; X_4 = 1; X_5 = 0; X_6 = 1$

Контрольные вопросы

1. Каковы назначение и область применения логических элементов?
2. Какие существуют основные логические операции? Как они записываются средствами булевой алгебры?
3. Как выглядят таблицы истинности для логических элементов «И-НЕ», «ИЛИ-НЕ»?
4. Что такое комбинационные устройства?
5. Как определять выходной сигнал комбинационных устройств при различных входных сигналах?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учебник / Л. А. Бессонов. – 12-е изд., испр. и доп. – М. : Юрайт, 2014. – 702 с.
2. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле : учебник / Л. А. Бессонов. – 11-е изд., испр. и доп. – М. : Юрайт, 2016. – 318 с.
3. Бобровников, Л. З. Электроника : учебник / Л. З. Бобровников. – СПб. : Питер, 2004. – 560 с.
4. Гальперин, М. В. Электронная техника : учебник / М. В. Гальперин. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2014. – 352 с.
5. Гусев, В. Г. Электроника и микропроцессорная техника : учебник / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. – М. : Высшая школа, 2008. – 800 с.
6. Дудников, И. Л. Основы электроники, микропроцессорной техники и техники связи : конспект лекций / И. Л. Дудников, И. П. Матвеевко. – Минск : БГАТУ, 2004. – 124 с.
7. Касаткин, А. С. Электротехника : учебник / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – 10-е изд., стереотип. – М. : Академия, 2007. – 544 с.
8. Китунович, Ф. Г. Электротехника : учебное пособие / Ф. Г. Китунович, С. Д. Зинчук. – Минск : Техноперспектива, 2004. – 357 с.
9. Миловзоров, О. В. Электроника : учебник / О. В. Миловзоров, И. Г. Панков. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Юрайт, 2015. – 408 с.
10. Прянишников, В. А. Электроника: полный курс лекций / В. А. Прянишников. – 5-е изд. – СПб. : КОРОНАпринт ; М. : Бином-Пресс, 2006. – 416 с.
11. Электронный учебно-методический комплекс «Электротехника и электроника» для группы специальностей 74 06 «Агроинженерия», специальности 1-36 12 01 «Проектирование и производство сельскохозяйственной техники» и направления специальности 1-54 01 01-06 «Метрология, стандартизация и сертификация (аграрно-промышленный комплекс)» / Е. В. Зайцев, А. П. Мириленко. – Минск : БГАТУ, 2015.

Дополнительная

12. Арестов, К. А. Основы электроники и микропроцессорной техники / К. А. Арестов. – М. : Колос, 2001. – 216 с.
13. Бабич, Н. П. Основы цифровой схемотехники : учебное пособие / Н. П. Бабич, И. А. Савелов. – М. : Додека-XXI, 2007. – 480 с.

14. Ибрагим, К. Ф. Основы электронной техники: элементы, схемы, системы / К. Ф. Ибрагим. – 2-е изд. – М. : Мир, 2001. – 400 с.

15. Лачин, В. И. Электроника : учебное пособие / В. И. Лачин. – 7-е изд. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2009. – 704 с.

16. Ловеров, В. Н. Электротехника и электроника : конспект лекций / В. Н. Ловеров. – Минск : БГАТУ, 2002. – Раздел 2: Электрические машины. – 108 с.

17. Теоретические основы электротехники : методические указания к практическим занятиям : в 3 ч. / сост.: В. С. Корко [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2003. – Ч. 1. – 137 с.

18. Угрюмов, Е. П. Цифровая схемотехника : учебное пособие / Е. П. Угрюмов. – 3-е изд. – СПб. : БХВ-Петербург, 2010. – 809 с.

19. Электротехника и электроника : методические указания к лабораторным работам / сост.: Е. В. Зайцев, И. И. Скочек. – Минск : БГАТУ, 2007. – 137 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Паспортные данные трехфазных асинхронных двигателей серии АИР

Тип двигателя	P_n , кВт	n_2 , об/мин	s , о. е.	КПД, %	$\cos\varphi$	I_n , А	Кратности			Масса, кг
							I_n / I_n	M_{\max} / M_n	M_n / M_n	
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>
$n_1 = 3000$ об/мин										
АИР56А2	0,18	2700	0,100	65,7	0,77	0,55	5,3	2,2	2,2	5,7
АИР56В2	0,25	2720	0,093	68	0,78	0,73	5,3	2,2	2,2	6,2
АИР63А2	0,37	2730	0,090	69,7	0,81	1	5,7	2,2	2,2	9
АИР63В2	0,55	2770	0,077	72,7	0,82	1,4	5,7	2,3	2,2	9,5
АИР71А2	0,75	2820	0,060	74	0,83	1,9	6,1	2,3	2,2	10,8
АИР71В2	1,1	2790	0,070	77,6	0,83	2,7	6,7	2,3	2,2	12,4
АИР80МА2	1,5	2830	0,057	78,1	0,84	3,6	7	2,3	2,2	15,5
АИР80МВ2	2,2	2840	0,053	80,6	0,85	5	7	2,3	2,2	19,5
АИР90L2	3	2845	0,052	83,4	0,86	6,5	7,2	2,3	2,2	21
АИР100S2	4	2870	0,043	83,7	0,88	8,4	7,5	2,3	2,2	30
АИР100L2	5,5	2870	0,043	84,8	0,89	11	7,5	2,3	2,2	34
АИР112M2	7,5	2880	0,040	85,4	0,88	15,2	7,2	2,4	2,2	53
АИР132M2	11	2900	0,033	87,4	0,90	21,8	7,2	2,3	2,2	90
АИР160S2	15	2925	0,025	88,4	0,88	30	7,1	2,4	2,2	120
АИР160M2	18,5	2925	0,025	89,3	0,89	36,3	7,1	2,4	2,2	140
АИР180S2	22	2940	0,020	89,8	0,90	42,7	7,2	2,5	2	170
АИР180M2	30	2940	0,020	90,7	0,90	56,9	7,3	2,5	2,1	203
АИР200M2	37	2940	0,020	91,2	0,89	71	7,1	2,4	2,1	247
АИР200L2	45	2945	0,018	91,8	0,89	84,9	7,1	2,4	2,1	255
АИР225M2	55	2960	0,013	92	0,90	103	7,1	2,4	2,1	325
АИР250S2	75	2970	0,010	92,6	0,90	139	6,9	2,6	2	450
АИР250M2	90	2970	0,010	92,5	0,90	167	6,4	2,5	2	530
АИР280S2	110	2970	0,010	93,4	0,91	201	6,7	2,3	1,9	650
АИР280M2	132	2975	0,008	93,5	0,91	240	6,4	2,4	1,9	700
$n_1 = 1500$ об/мин										
АИР56А4	0,12	1325	0,117	56,5	0,66	0,5	4,6	2,2	2,1	5,7
АИР56В4	0,18	1325	0,117	61,2	0,68	0,7	4,9	2,2	2,1	6
АИР63А4	0,25	1325	0,117	64,5	0,73	0,82	5,1	2,2	2,1	9
АИР63В4	0,37	1325	0,117	66,3	0,76	1,12	5,1	2,2	2,1	9,5
АИР71А4	0,55	1350	0,100	70	0,73	1,75	5,4	2,3	2,2	11
АИР71В4	0,75	1360	0,093	71,3	0,77	2,2	5,7	2,3	2,2	12

Продолжение приложения

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
АИР80МА4	1,1	1375	0,083	74,5	0,76	3,04	5,8	2,3	2,3	16
АИР80МВ4	1,5	1390	0,073	77,5	0,78	3,95	6,2	2,3	2,3	19,5
АИР90Л4	2,2	1400	0,067	80	0,81	5,3	6,8	2,3	2,3	25
АИР100S4	3	1420	0,053	81,4	0,82	7,2	7	2,3	2,3	34
АИР100Л4	4	1420	0,053	82,8	0,81	9,3	7	2,3	2,3	37
АИР112М4	5,5	1430	0,047	84,1	0,82	12,3	6,6	2,3	2,3	55
АИР132S4	7,5	1440	0,040	86	0,84	16,1	6,7	2,3	2,2	80
АИР132М4	11	1450	0,033	87,1	0,84	23,1	6,8	2,3	2,2	91
АИР160S4	15	1455	0,030	88,7	0,85	30,8	6,8	2,3	2,2	138
АИР160М4	18,5	1455	0,030	89,8	0,86	37,8	6,8	2,3	2,2	142
АИР180S4	22	1465	0,023	90,6	0,86	44,4	7	2,4	2,1	177
АИР180М4	30	1465	0,023	91,2	0,86	59,6	6,8	2,3	2,1	190
АИР200М4	37	1470	0,020	92	0,87	73,1	7	2,3	2,2	247
АИР200Л4	45	1465	0,023	92,3	0,87	88,4	6,9	2,4	2,2	260
АИР225М4	55	1480	0,013	92,4	0,87	106	6,7	2,3	2,2	326
АИР250S4	75	1475	0,017	92,9	0,86	146	6,9	2,3	2,2	477
АИР250М4	90	1475	0,017	93,3	0,87	170	6,4	2,4	2,2	485
АИР280S4	110	1480	0,013	93,8	0,88	207	6,6	2,2	2,1	731
$n_1 = 1000 \text{ об/мин}$										
АИР63А6	0,18	860	0,140	55,5	0,64	0,8	4,1	2	1,9	9,5
АИР63В6	0,25	860	0,140	58,3	0,65	1,1	4	2	1,9	10
АИР71А6	0,37	895	0,105	62,8	0,68	1,33	4,7	2	1,9	12,4
АИР71В6	0,55	895	0,105	65,7	0,70	1,9	4,7	2	1,9	12,2
АИР80МА6	0,75	910	0,090	69	0,72	2,29	5,3	2,1	2	16
АИР80МВ6	1,1	910	0,090	72,1	0,74	3,18	5,3	2,1	2	20
АИР90Л6	1,5	920	0,080	76	0,74	4,2	6	2,1	2	25
АИР100Л6	2,2	930	0,070	77,1	0,76	5,9	6,3	2,1	2	38
АИР112МА6	3	935	0,065	80,1	0,76	7,9	5,7	2,2	2,1	51
АИР112МВ6	4	935	0,065	80,7	0,77	10,3	5,7	2,1	2,1	52
АИР132S6	5,5	955	0,045	82,8	0,78	13,4	6,3	2,1	2,1	71
АИР132М6	7,5	960	0,040	84,1	0,80	17,2	6,2	2,2	2,1	78
АИР160S6	11	965	0,035	86,8	0,79	24,6	6,3	2,2	2	141
АИР160М6	15	965	0,035	88,2	0,81	33	6,5	2,2	2	155
АИР180М6	18,5	970	0,030	88,9	0,82	39	6,6	2,1	2,1	200
АИР200М6	22	975	0,025	89,7	0,83	45,2	6,3	2,2	2,1	233
АИР200Л6	30	975	0,025	89,8	0,84	61,8	6,5	2,2	2,1	250
АИР225М6	37	980	0,020	91,3	0,85	73,5	6,6	2,1	2,1	360
АИР250S6	45	980	0,020	92	0,85	90,1	6,7	2,2	2,1	465
АИР250М6	55	985	0,015	92,4	0,84	110	6,8	2,3	2,2	520
АИР280S6	75	985	0,015	93	0,85	150	6,6	2,1	2	800

Окончание приложения

<i>l</i>	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
АИР280М6	90	985	0,015	92,9	0,85	177	6,6	2,2	2,2	800
АИР315S6	110	985	0,015	94,2	0,86	207	6,3	2,2	2	1045
АИР315М6	132	985	0,015	94,4	0,87	244	6,1	2,2	2	1103
АИР355S6	160	990	0,010	94,7	0,87	292	6,6	2,2	1,9	1748
АИР355М6	200	990	0,010	94,7	0,87	365	6,7	2,2	1,9	1934
АИР355МВ6	250	990	0,010	95,1	0,88	456	6,6	2,3	1,9	2050
<i>n</i> ₁ = 750 об/мин										
АИР71В8	0,25	655	0,127	54,5	0,60	1,17	3,7	1,9	1,8	10,4
АИР80МА8	0,37	675	0,100	60,1	0,62	1,5	4,3	1,9	1,8	18
АИР80МВ8	0,55	675	0,100	62,9	0,62	2,18	4	2	1,8	18,9
АИР90ЛА8	0,75	685	0,087	72,4	0,70	2,33	4	2	1,9	30
АИР90ЛВ8	1,1	685	0,087	73	0,69	3,27	4	2	1,8	32
АИР100Л8	1,5	690	0,080	73,5	0,72	4,5	4,7	2	1,9	49,3
АИР112МА8	2,2	700	0,067	75,6	0,71	6,4	4,9	2,1	2	46
АИР112МВ8	3	700	0,067	76,9	0,71	8,6	5	2,1	2	53
АИР132S8	4	715	0,047	81,9	0,78	10,8	5,6	2,1	2,1	92
АИР132М8	5,5	715	0,047	80,9	0,74	14,7	5,6	2,1	2,1	86
АИР160S8	7,5	720	0,040	85,2	0,74	19,2	5,8	2,1	2	148
АИР160М8	11	720	0,040	86,4	0,76	27,3	5,8	2,1	2	155
АИР180М8	15	725	0,033	87,6	0,78	34,5	6,2	2	2	210
АИР200М8	18,5	730	0,027	89	0,78	41,6	6,2	2,1	1,9	250
АИР200Л8	22	730	0,027	89,6	0,78	49,4	6,2	2,1	2	260
АИР225М8	30	735	0,020	90,6	0,78	65,3	6,5	2,1	2	360
АИР250S8	37	735	0,020	90,5	0,77	82,1	6,2	2,3	2,1	465
АИР250М8	45	735	0,020	91,5	0,77	99,1	6,2	2,3	2,1	520
АИР280S8	55	735	0,020	92	0,80	121	6	2	1,9	725
АИР280М8	75	740	0,013	92	0,81	154	5,8	2,1	1,9	800
АИР315S8	90	740	0,013	93,8	0,82	178	6,2	2,3	2	1160
АИР315М8	110	740	0,013	94	0,82	217	6,1	2,2	2	1175
АИР355S8	132	740	0,013	93,9	0,82	261	6,3	2,2	1,7	2000
АИР355М8	160	740	0,013	94,3	0,82	315	6,3	2,2	1,7	2150
АИР355МВ8	200	740	0,013	94,6	0,83	388	6,4	2,3	1,8	2250
<i>n</i> ₁ = 600 об/мин										
АИР315S10	55	590	0,017	92	0,75	121	6,2	2	1,5	1150
АИР315М10	75	590	0,017	92,5	0,76	162	6,2	2	1,5	1220
АИР355S10	90	590	0,017	93	0,77	188	6,2	2	1,3	1530
АИР355МА10	110	590	0,017	93,2	0,78	230	6	2	1,3	1640
АИР355МВ10	132	590	0,017	93,5	0,78	275	6	2	1,3	1690
АИР355М10	160	590	0,017	93,5	0,78	334	6	2	1,3	1690

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Учебное издание

**ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ.
ПРАКТИКУМ**

Учебно-методическое пособие

Составители:

Мириленко Андрей Петрович,
Курочкин Василий Александрович,
Зайцев Евгений Валерьевич и др.

Ответственный за выпуск *В. А. Ковалев*
Корректор *Д. А. Значёнок*
Компьютерная верстка *Д. А. Значёнок*
Дизайн обложки *Д. О. Бабаковой*

Подписано в печать 10.09.2020. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 4,88. Уч.-изд. л. 3,82. Тираж 99 экз. Заказ 332.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Учреждение образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий
№ 1/359 от 09.06.2014.
№ 2/151 от 11.06.2014.
Пр-т Независимости, 99–2, 220023, Минск.