ISBN 5-06-003995-1
9 785060 039955

ЗАДАЧНИК

Т.Ф.Березкина
Н.Г.Гусев
В.В.Масленников

Т.Ф.Березкина
Н.Г.Гусев
В.В.Масленников

Задачник по общей электротехнике с основами электроники

ВЫСШАЯ ШКОЛА

Т.Ф.Березкина,
Н.Г.Гусев,
В.В.Масленников

Задачник по общей электротехнике с основами электроники

ИЗДАНИЕ ЧЕТВЕРТОЕ, СТЕРЕОТИПНОЕ

Рекомендовано Министерством образования Российской Федерации в качестве учебного пособия для студентов неэлектротехнических специальностей средних специальных учебных заведений

Москва
«Высшая школа» 2001

УДК 621.3
ББК 31.2
Б 48

Рецензент: заслуженный учитель России К.В. Шкуренко

Березкина Т.Ф. и др.

Б 48 Задачник по общей электротехнике с основами электроники: Учеб. пособие для студ. неэлектротехн. спец. средних спец. учеб. заведений/Т.Ф. Березкина, Н.Г. Гусев, В.В. Масленников. — 4-е изд., стер. — М.: Высш. шк., 2001. — 380 с.: ил.

ISBN 5-06-003995-1

Пособие содержит два раздела, в начале каждой главы приводятся основные формулы и уравнения, типовые задачи с решениями и пояснениями и задачи для самостоятельного решения.

Задачник может быть использован студентами дневной, вечерней и заочной форм обучения.

УДК 621.3
ББК 31.2

ISBN 5-06-003995-1 © ГУП «Издательство «Высшая школа», 2001

Оригинал-макет данного издания является собственностью издательства «Высшая школа» и его репродуцирование (воспроизведение) любым способом без согласия издательства запрещается.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Задачник соответствует программе курса «Общая электротехника с основами электроники». Для успешного усвоения учебного материала и облегчения решения задач в начале каждой главы приведены основные формулы. В сборнике имеется значительное количество вопросов, которые можно использовать для самостоятельной работы студентов при изучении теоретического материала с целью контроля полученных знаний и при выполнении письменных контрольных работ. Подбор вопросов и задач соответствует расположению учебного материала в темах программы.

В каждой главе имеются задачи повышенной трудности, отмеченные звездочкой. Для более эффективного контроля за самостоятельной работой студентов для ряда задач средней трудности даны одинаковые условия, но различные числовые данные. Эти задачи можно использовать не только для домашних заданий, но и для контрольных работ, проведения олимпиад, экзаменов. Цифровые данные, приведенные в задачах, реальны и соответствуют истинным данным аппаратов и электро- и радиотехнических устройств. Во всех задачах, где не указана частота переменного тока, она принята равной 50 Гц.

Гл. 1—6 и 8 написаны Т.Ф. Березкиной; предисловие, приложение, гл. 7 и 9—12—Н.Г. Гусевым; гл. 13—19—В.В. Масленниковым.

Авторы выражают благодарность рецензенту — заслуженному учителю России К.В. Шкуренко — за ряд ценных замечаний, сделанных при рецензировании книги.

Пожелания и замечания по книге просим направлять по адресу: 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., 29/14, издательство «Высшая школа».

Авторы

Раздел первый

ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Глава 1
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ И УРАВНЕНИЯ

Напряженность электрического поля. Закон Кулона. *Электрическое поле* — это одна из двух сторон электромагнитного поля, характеризующаяся воздействием на электрически заряженную частицу с силой, пропорциональной заряду частицы и не зависящей от ее скорости.

Векторную величину, характеризующую электрическое поле и определяющую силу, действующую на заряженную частицу со стороны электрического поля, называют *напряженностью электрического поля в данной точке*:

$$E=F/Q. \qquad (1.1)$$

Напряженность электрического поля точечного заряда (В/м)

$$E=\frac{Q}{4\pi r^2\varepsilon_a}, \qquad (1.2)$$

где r — расстояние между зарядом и точкой, в которой определяется напряженность поля, м; ε_a — абсолютная диэлектрическая проницаемость среды, характеризующая диэлектрические свойства диэлектрика, Ф/м.

Напряженность в любой точке поля, создаваемая несколькими точечными зарядами, определяется геометрической суммой напряженностей полей:

$$\mathbf{E}=\mathbf{E}_1+\mathbf{E}_2+\ \ldots\ +\mathbf{E}_n,$$

где $\mathbf{E}_1$, $\mathbf{E}_2$, ..., $\mathbf{E}_n$ — напряженности электрического поля, создаваемые каждым зарядом и определяемые по формуле (1.2).

Силу взаимодействия двух точечных пробных зарядов Q_1 и Q_2, выражаемую в ньютонах (Н), определяют по закону Кулона:

$$F=\frac{Q_1Q_2}{4\pi r^2\varepsilon_a}, \qquad (1.3)$$

где Q_1 и Q_2 — электрические заряды, Кл; r — расстояние между зарядами, м.

Абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума равна электрической постоянной: $\varepsilon_0=8{,}85\cdot10^{-12}$ Ф/м.

Диэлектрическую проницаемость других сред обычно выражают в относительных единицах:

$$\varepsilon=\varepsilon_a/\varepsilon_0,$$

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость вещества.

Электрическое напряжение и потенциал. При перемещении заряда Q в равномерном поле на расстояние l по направлению сил поля совершается работа

$$A=Fl=EQl.$$

При этом между крайними точками перемещения заряда существует напряжение U — скалярная величина, характеризуемая работой, которая производится при перемещении единицы положительного заряда между двумя точками поля:

$$U=A/Q \text{ или } U=El. \qquad (1.4)$$

Напряжение между данной точкой электрического поля и другой произвольно выбранной точкой поля, потенциал которой условно принят равным нулю, называют *потенциалом* φ данной точки поля. В электротехнике нулевым потенциалом принято считать потенциал земли.

Напряжение между двумя точками электрического поля (В), имеющими потенциалы φ_1 и φ_2,

$$U=\varphi_1-\varphi_2. \qquad (1.5)$$

В веществе, помещаемом в электрическом поле, под действием сил электрического поля возникает направленное движение носителей зарядов (электронов, ионов) — электрический ток. Это свойство называют электропроводностью вещества. Степень электропроводности вещества оценивают удельной электрической проводимостью материала.

Все вещества подразделяют на проводники, полупроводники и диэлектрики.

При внесении диэлектрика в электрическое поле происходит его поляризация, в результате чего ослабляется основное поле.

Диэлектрическая проницаемость ε показывает, во сколько раз ослабляется основное поле вследствие поляризации.

Напряженность поля, при которой происходит пробой диэлектрика, называют электрической прочностью диэлектрика $E_{пр}$, а напряжение при пробое — пробивным напряжением $U_{пр}$, причем

$$E_{пр}=U_{пр}/d, \qquad (1.6)$$

где d — толщина пластины.

Электрическая емкость конденсатора. Электрический конденсатор — это система из двух проводников (обкладок, пластин), разделенных диэлектриком.

Конденсаторы обладают свойством накапливать на своих обкладках электрические заряды, равные по величине и противоположные по знаку.

Электрический заряд Q каждой из обкладок пропорционален напряжению U между ними:

$$Q=CU. \qquad (1.7)$$

Величину C, равную отношению заряда одной из обкладок конденсатора к напряжению между ними, называют *электрической емкостью конденсатора* и выражают в фарадах (Ф).

Емкость конденсатора зависит от геометрических размеров, формы, взаимного расположения и расстояния между обкладками, а также от свойств диэлектрика. Наиболее распространенным в технике является плоский конденсатор.

Емкость плоского конденсатора

$$C=\varepsilon_0\varepsilon S/d=\varepsilon_a S/d, \qquad (1.8)$$

где S — площадь каждой обкладки, пластины, м^2; d — расстояние между обкладками, м.

Напряженность электрического поля плоского конденсатора

$$E= \ /d, \qquad (1.9)$$

где U — напряжение, приложенное к зажимам конденсатора, В.

Конденсаторы могут быть соединены последовательно, параллельно и смешанно (последовательно-параллельно).

Последовательное соединение. При таком соединении на обкладках всех конденсаторов будут одинаковые по величине заряды, т. е.

$$Q_1=Q_2=Q_3=\ \dots\ =Q_n=Q.$$

Напряжения на конденсаторах будут различны, так как они зависят от их емкостей:

$$U_1=Q_1/C_1,\ U_2=Q_2/C_2,\ \dots,\ U_n=Q_n/C_n.$$

Общее напряжение

$$U=U_1+U_2+\ \dots\ +U_n.$$

Общая, или эквивалентная, емкость

$$C=\frac{Q}{U}=\frac{Q}{U_1+U_2+\ \dots\ +U_n},$$

откуда

$$\frac{1}{C}=\frac{U_1+U_2+\ \dots\ +U_n}{Q}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\ \dots\ +\frac{1}{C_n}.$$

Для двух последовательно включенных конденсаторов

$$C=C_1C_2/(C_1+C_2). \qquad (1.10)$$

Параллельное соединение. При параллельном соединении напряжение на всех конденсаторах одинаково.

Заряды на обкладках отдельных конденсаторов при различной их емкости

$$Q_1=UC_1,\ Q_2=UC_2,\ \dots,\ Q_n=UC_n.$$

Заряд, полученный всеми параллельно соединенными конденсаторами,

$$Q=Q_1+Q_2+\ \dots\ +Q_n.$$

Общая, или эквивалентная, емкость

$$C=\frac{Q}{U}=\frac{Q_1+Q_2+\ \dots\ +Q_n}{U}=C_1+C_2+\ \dots\ +C_n. \qquad (1.11)$$

Энергия электрического поля (Дж)

$$W=CU^2/2. \qquad (1.12)$$

ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ С РЕШЕНИЯМИ

1.1. На заряд $Q=16\cdot10^{-8}$ Кл действует сила $F=2{,}4\cdot10^{-3}$ Н. Найти напряженность электрического поля в данной точке. Определить заряд Q_0,

создающий это поле, если он удален от этой точки на расстояние $r=0{,}3$ м в вакууме.

Решение. Напряженность поля в данной точке

$$E=F/Q=2{,}4\cdot10^{-3}/(16\cdot10^{-8})=0{,}15\cdot10^{5}\ \text{В/м}.$$

Значение заряда при данной напряженности $Q_0=E4\pi\varepsilon\varepsilon_0r^2=0{,}15\cdot10^{5}\cdot4\cdot3{,}14\cdot8{,}85\cdot10^{-12}\cdot(0{,}3)^2=15\cdot10^{-8}$ Кл.

1.2. Два разнополярных заряда в стекле $Q_1=+3{,}5\cdot10^{-9}$ Кл и $Q_2=-3{,}5\cdot10^{-9}$ Кл находятся на расстоянии $r=18$ см друг от друга. Заряд $Q_3=+2\cdot10^{-8}$ Кл расположен на расстоянии $r=24$ см от этих двух зарядов. Определить значение и направление напряженности поля E в точке, находящейся посередине между зарядами Q_1 и Q_2.

Решение. Определим напряженность электрического поля от действия заряда Q_1 в искомой точке

$$E_1=\frac{Q_1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0r_1^2}=\frac{3{,}5\cdot10^{-9}}{4\cdot3{,}14\cdot7\cdot8{,}85\cdot10^{-12}\cdot9^2\cdot10^{-4}}=550\ \text{В/м}.$$

Напряженность $E_2=550$ В/м, так как $Q_1=Q_2$ и $r_1=r_2$.

Для определения напряженности в этой же точке от действия заряда Q_3 необходимо найти расстояние r_3 этой точки от заряда Q_3: из прямоугольного треугольника имеем

$$r_3=\sqrt{24^2-9^2}=22{,}2\ \text{см}.$$

Найдем напряженность E_3:

$$E_3=\frac{Q_3}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0r_3^2}=\frac{2\cdot10^{-8}}{4\cdot3{,}14\cdot7\cdot8{,}85\cdot10^{-12}(22{,}2)^2\cdot10^{-4}}=520\ \text{В/м}.$$

Определим вектор напряженности поля в указанной точке:

$$\mathbf{E}=\mathbf{E}_1+\mathbf{E}_2+\mathbf{E}_3.$$

Векторы $\mathbf{E}_1$ и $\mathbf{E}_2$ направлены в одну сторону (так как заряды Q_1 и Q_2 разноименные) и $\mathbf{E}_{12}=\mathbf{E}_1+\mathbf{E}_2=550+550=1100$ В/м.

Вектор $\mathbf{E}_3$ направлен перпендикулярно вектору $\mathbf{E}_{12}$, и суммарный вектор напряженности:

$$\mathbf{E}=\sqrt{1100^2+520^2}=1220\ \text{В/м}.$$

При определении направления вектора $\mathbf{E}$ необходимо помнить, что оно совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд.

1.3. К выводам плоского воздушного конденсатора приложено напряжение $U=800$ В. Определить напряженность электрического поля конденсатора при расстоянии между пластинами $d=5$ мм и силу, действующую в этом поле на единичный заряд $Q=1{,}5\cdot10^{-7}$ Кл. Определить емкость конденсатора, если площадь каждой пластины $S=24$ см^2. Как изменится его емкость, если конденсатор поместить в спирт?

Решение. Напряженность электрического поля плоского конденсатора

$$E=U/d=800/(5\cdot10^{-3})=16\cdot10^{4}.$$

Если заряд помещен в электрическое поле конденсатора, то

$$F=EQ=16\cdot10^{4}\cdot1{,}5\cdot10^{-7}=0{,}024\ \text{Н}.$$

Емкость плоского воздушного конденсатора

$$C=\frac{\varepsilon\varepsilon_0S}{d}=\frac{8{,}85\cdot10^{-12}\cdot24\cdot10^{-4}}{0{,}5\cdot10^{-2}}=4{,}25\cdot10^{-12}\ \Phi=4{,}25\ \text{пФ}.$$

Если конденсатор помещен в спирт, диэлектрическая проницаемость которого $\varepsilon=33$, емкость увеличивается в 33 раза при неизменных расстоянии между пластинами и площади пластин:

$$C'=C\varepsilon=4{,}25\ \text{пФ}\cdot33=140\ \text{пФ}.$$

1.4. Два плоских конденсатора емкостями $C1=0{,}5$ мкФ и $C2=1{,}5$ мкФ соединены последовательно и подключены к источнику питания. При этом на обкладках конденсаторов появился заряд $Q=4{,}5\cdot10^{-4}$ Кл. Оба конденсатора имеют одинаковые площади пластин и одинаковый диэлектрик. Определить общую (эквивалентную) емкость соединения, подведенное напряжение, падение напряжения на обоих конденсаторах и расстояние между пластинами первого конденсатора, если напряженность электрического поля второго конденсатора $E=2000$ В/см. Определить энергию электрического поля эквивалентного конденсатора.

Решение. Определим напряжения U_1 и U_2 на конденсаторах: $U_1 = Q/C_1 = 4{,}5 \cdot 10^{-4}/(0{,}5 \cdot 10^{-6}) = 900$ В; $U_2 = Q/C_2 = 4{,}5 \cdot 10^{-4}/(1{,}5 \cdot 10^{-6}) = 300$ В.

Напряжение, подведенное к зажимам цепи, $U = U_1 + U_2 = 900 + 300 = 1200$ В.

Общая, или эквивалентная, емкость последовательно соединенных конденсаторов

$$C = C_1 C_2/(C_1 + C_2) = 0{,}5 \cdot 1{,}5/(0{,}5 + 1{,}5) = 0{,}375 \text{ мкФ},$$

или

$$C = Q/U = 4{,}5 \cdot 10^{-4}/1200 = 0{,}375 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} = 0{,}375 \text{ мкФ}.$$

Определим расстояние между пластинами второго конденсатора по (1.9): $d_2 = U_2/E = 300/2000 = 0{,}15$ см.

Если конденсаторы имеют одинаковые площади пластин и один и тот же диэлектрик, то

$$C_1/C_2 = d_2/d_1,$$

откуда

$$d_1 = \frac{C_2 d_2}{C_1} = \frac{1{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}15}{0{,}5 \cdot 10^{-6}} = 0{,}45 \text{ см}.$$

Энергию электрического поля найдем по (1.12)

$$W = CU^2/2 = 0{,}375 \cdot 10^{-6} \cdot 1200^2/2 = 0{,}29 \text{ Дж}.$$

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

1.5. Определить, какими должны быть полярность и расстояние между двумя зарядами $Q_1 = 1{,}6 \cdot 10^{-6}$ Кл и $Q_2 = 8 \cdot 10^{-5}$ Кл, чтобы они отталкивались с силой $F = 3{,}2$ Н, будучи помещенными в воду, керосин.

1.6. Два заряда $Q_1 = 5 \cdot 10^{-8}$ Кл и $Q_2 = 12 \cdot 10^{-8}$ Кл, находящиеся на расстоянии $r = 20$ см друг от друга, разделены диэлектриком, в качестве которого использована парафинированная бумага. Определить силу взаимодействия этих зарядов. Как она изменится, если убрать диэлектрик?

1.7. Определить силу взаимодействия двух зарядов $Q_1 = 3{,}5 \cdot 10^{-7}$ Кл и $Q_2 = 6 \cdot 10^{-7}$ Кл, находящихся на расстоянии $r = 5$ см друг от друга и помещенных в воду. Как изменится сила взаимодействия, если воду заменить: 1) трансформаторным маслом; 2) спиртом; 3) керосином; 4) парафином?

1.8. Два заряда Q_1 и Q_2, находящиеся на расстоянии $r = 10$ см в воздухе, взаимодействуют с силой

$F = 1{,}2$ Н. Определить заряд Q_2, если известно, что $Q_1 = 6 \cdot 10^{-7}$ Кл.

1.9. Между двумя зарядами $Q_1 = 22 \cdot 10^{-7}$ Кл и $Q_2 = 5 \cdot 10^{-7}$ Кл помещен электрокартон. Сила взаимодействия этих зарядов $F = 0{,}8$ Н. Определить расстояние между ними.

1.10. Два заряда Q_1 и Q_2, находящиеся на расстоянии $r = 25$ см в воздухе, взаимодействуют с силой $F = 0{,}1$ Н. Определить заряд Q_2, если $Q_1 = 1{,}5 \cdot 10^{-6}$ Кл. Как изменится Q_2, если между зарядами поместить: 1) стекло; 2) плексиглас; 3) янтарь; 4) эбонит; 5) воду; 6) фарфор?

1.11. Сила взаимодействия двух зарядов, находящихся в воздухе, $F = 3$ Н; $Q_1 = 3 \cdot 10^{-5}$ Кл и $Q_2 = 0{,}6 \cdot 10^{-5}$ Кл. Определить расстояние между ними. Как изменится расстояние между зарядами, если их поместить: 1) в трансформаторное масло; 2) в парафин; 3) в воду; 4) в спирт; 5) в керосин?

1.12*. В вершины прямоугольного треугольника ABC с прямым углом в вершине A помещены заряды: в вершины B и C — положительные заряды $Q_1 = Q_2 = 0{,}8 \cdot 10^{-6}$ Кл, в вершину A — отрицательный заряд $Q_3 = 2 \cdot 10^{-6}$ Кл. Заряды находятся в спирте, и расстояние между ними $AB = 6$ см, $AC = 8$ см. Определить значения и направления составляющих сил взаимодействия этих зарядов во всех точках.

1.13. Определить напряженность электрического поля, действующего с силой $F = 5{,}4 \cdot 10^{-4}$ Н на заряд $Q = 1{,}8 \cdot 10^{-3}$ Кл.

1.14. Электрическое поле с напряженностью $E = 0{,}8$ В/м действует на заряд с силой $F = 9{,}6 \cdot 10^{-4}$ Н. Определить этот заряд.

1.15. Определить силу, с которой действует электрическое поле, имеющее напряженность $E = 1{,}4$ В/м, на заряд $Q = 4 \cdot 10^{-6}$ Кл.

1.16. На расстоянии $r = 1{,}5$ см от заряда Q, находящегося в воздухе, напряженность электрического поля $E = 650$ кВ/м. Определить заряд Q.

1.17. Два разноименных заряда $Q_1 = 5 \cdot 10^{-6}$ Кл и $Q_2 = 2{,}8 \cdot 10^{-6}$ Кл находятся в воде на расстоянии $r = 0{,}5$ м друг от друга. Определить напряженность поля в точке, находящейся посередине между этими зарядами.

1.18. Два одноименных заряда $Q_1 = 16 \cdot 10^{-8}$ Кл и $Q_2 = 50 \cdot 10^{-8}$ Кл находятся на расстоянии $r = 10$ см

друг от друга в воздухе. Определить напряженность в точке, находящейся посередине между этими зарядами, и силу их взаимодействия.

1.19. Два положительных заряда Q_1 и $Q_2=4Q_1$ находятся на расстоянии $r=12$ см. Определить, на каком расстоянии от Q_2 находится точка, где напряженность поля отсутствует.

1.20*. Два положительных заряда $Q_1=2\cdot10^{-10}$ Кл и $Q_2=4{,}5\cdot10^{-10}$ находятся в воде на расстоянии $r=4{,}7$ см друг от друга. Определить значение и направление напряженности в точке, находящейся на расстоянии 2,5 см от заряда Q_1 и 4 см от заряда Q_2 (катеты прямоугольного треугольника), и силу взаимодействия этих зарядов. Определить также вектор напряженности в этой точке, если: а) Q_1 — отрицательный, Q_2 — положительный заряды; б) Q_1 и Q_2 — отрицательные заряды.

1.21*. Положительные заряды $Q=350\cdot10^{-10}$ Кл находятся в трех вершинах квадрата со стороной 30 см. Определить напряженность поля в четвертой вершине квадрата (воздушная среда).

1.22. Определить заряд, перемещенный в точку поля с потенциалом $\varphi=10$ В, если при этом совершена работа $A=0{,}5\cdot10^{-6}$ Дж.

1.23. Потенциал электрического поля $\varphi=20$ В. Определить работу, совершаемую силами этого поля, при внесении в него заряда $Q=5{,}5\cdot10^{-4}$ Кл.

1.24. Напряженность электрического поля $E=5\cdot10^{-2}$ В/м. Определить силу, с которой действует это поле на заряд $Q=1{,}6\cdot10^{-3}$ Кл, и работу по перемещению этого заряда в точку поля с потенциалом $\varphi=45$ В.

1.25. Напряженность однородного электрического поля $E=250$ В/м. Между точками *1* и *2* этого поля, находящимися на расстоянии $r=20$ см, перемещается положительный заряд $Q=5{,}5\cdot10^{-4}$ Кл вдоль линий поля. Определить разность потенциалов между этими точками и работу по перемещению этого заряда из точки *1* в точку *2*.

1.26. Определить разность потенциалов между двумя точками электрического поля, если при перемещении заряда $Q=0{,}5\cdot10^{-6}$ Кл совершена работа $A=18\cdot10^{-5}$ Дж.

1.27. Два заряда $Q_1=+12\cdot10^{-10}$ Кл и $Q_2=-12\cdot10^{-10}$ Кл находятся на расстоянии

$r=50$ см в слюде. Определить потенциал точки, находящейся между ними на расстоянии $r=20$ см от заряда Q_1.

1.28. Разность потенциалов между двумя зажимами батареи $U=4{,}5$ В. Определить работу, которую необходимо совершить по перемещению заряда $Q=3\cdot10^{-6}$ Кл от одного до другого зажима. Определить также потенциалы: φ_1 — зажима «+» при заземлении зажима «−» батареи, и φ_2 — зажима «−» при заземлении зажима «+» батареи.

1.29. Образец резины толщиной 5 мм пробивается при напряжении $U=8{,}5$ кВ. Определить электрическую прочность этого материала.

1.30. Определить напряжение, при котором будет пробит образец: 1) из стекла толщиной 0,2 см; 2) из фарфора толщиной 0,1 см; 3) из электроизоляционного картона толщиной 1,5 мм.

1.31. Расстояние между пластинами воздушного конденсатора $d=3$ мм. Определить напряжение, при котором может быть пробит этот воздушный промежуток.

1.32. Определить толщину слоя электрокартона между пластинами плоского конденсатора, рассчитанного на номинальное напряжение $U_{ном}=1000$ В. Конденсатор должен иметь двукратный запас прочности по напряжению (2 кВ).

1.33. Определить напряженность электрического поля в плоском воздушном конденсаторе, заряженном до напряжения $U=500$ В. Расстояние между пластинами $d=8$ мм. Определить напряжение на конденсаторе, если расстояние между пластинами: а) уменьшить вдвое; б) увеличить до 12 мм.

1.34. Между двумя металлическими обкладками, заряженными до напряжения $U=150$ В, находится пластина из эбонита. Как изменится напряжение между обкладками, если пластину из эбонита заменить пластиной из слюды той же толщины?

1.35. Определить емкость конденсатора, если он был заряжен до напряжения $U=250$ В. При этом заряд конденсатора $Q=10^{-4}$ Кл.

1.36. Плоский конденсатор имеет емкость $C=3300$ пФ. Определить площадь пластин и толщину диэлектрика из слюды. Номинальное напряжение конденсатора $U_{ном}=1500$ В, и он должен иметь четырехкратный запас прочности по напряжению (6 кВ).

1.37. Определить напряженность электрического поля между пластинами плоского конденсатора, находящимися на расстоянии $d=3$ мм, если напряжение, приложенное к ним, $U=450$ В. Определить емкость этого конденсатора при условии, что заряд на его пластинах $Q=3\cdot10^{-4}$ Кл.

1.38*. Определить толщину воздушного слоя конденсатора емкостью $C=0{,}001$ мкФ и площадь его пластин, если его номинальное напряжение $U_{ном}=2$ кВ должно быть в 2,5 раза меньше напряжения пробоя. Используя при тех же условиях в качестве диэлектрика стекло, определить его толщину и площадь пластин конденсатора.

1.39. Плоский воздушный конденсатор емкостью $C=1$ мкФ заряжен от источника постоянного тока напряжением 27 В. Определить заряд и напряженность электрического поля заряженного конденсатора при расстоянии между его пластинами $d=1{,}5$ мм. Определить также энергию электрического поля.

1.40. Емкость конденсатора $C=1{,}5$ мкФ, заряд на его обкладках $Q=45\cdot10^{-5}$ Кл. Определить напряжение на зажимах конденсатора.

1.41. Конденсатор заряжен от источника питания напряжением $U=100$ В. Энергия электрического поля конденсатора $W=6\cdot10^{-3}$ Дж. Определить его емкость.

1.42. К конденсатору емкостью $C=0{,}25$ мкФ подведено напряжение $U=400$ В. Определить энергию электрического поля конденсатора.

1.43. Энергия W электрического поля конденсатора емкостью $C=0{,}015$ мкФ составляет $4{,}7\cdot10^{-4}$ Дж. Определить напряжение, приложенное к конденсатору.

1.44. При напряжении $U=800$ В плоский конденсатор приобрел заряд $Q=20\cdot10^{-6}$ Кл. Определить емкость конденсатора и энергию электрического поля.

1.45*. Определить электрический заряд плоского конденсатора и напряженность поля, если к конденсатору приложено напряжение $U=360$ В. Емкость конденсатора $C=4\cdot10^{-4}$ мкФ, в качестве диэлектрика использован плексиглас, площадь каждой обкладки конденсатора $S=250$ см^2. Как изменится напряженность поля, если удалить пластину из плексигласа?

1.46. Определить емкость плоского конденсатора, имеющего обкладки площадью $S=240$ см^2 каждая.

Диэлектрик — парафинированная бумага. Расстояние между пластинами $d=5$ мм.

1.47. Определить емкость плоского воздушного конденсатора, имеющего обкладки площадью 20 см^2 каждая, расстояние между которыми $d=0{,}8$ см.

1.48. Определить емкость плоского воздушного конденсатора, если площадь каждой пластины $S=100$ см^2, расстояние между ними $d=0{,}4$ мм. Как изменится расстояние между пластинами при той же емкости конденсатора, если в качестве диэлектрика использовать электрокартон?

1.49. Определить эквивалентную (общую) емкость C двух последовательно включенных конденсаторов $C1=C2=0{,}7$ мкФ.

1.50. Общая емкость двух последовательно включенных конденсаторов $C=1{,}2$ мкФ. Емкость одного конденсатора $C1=3$ мкФ. Определить емкость второго конденсатора.

1.51. Конденсаторы емкостями $C1=10$ мкФ и $C2=15$ мкФ соединены последовательно. Определить их эквивалентную емкость.

1.52. Три конденсатора одинаковой емкости $C1=C2=C3=12$ мкФ соединены последовательно. Определить их эквивалентную емкость.

1.53. Общая емкость трех последовательно соединенных конденсаторов $C=0{,}08$ мкФ. Определить емкость одного из конденсаторов, если емкости $C1=0{,}2$ мкФ, $C2=0{,}4$ мкФ. Определить их эквивалентную емкость при параллельном соединении конденсаторов.

1.54. Четыре конденсатора емкостями $C1=0{,}18$ мкФ, $C2=0{,}7$ мкФ, $C3=0{,}12$ мкФ и $C4=0{,}5$ мкФ соединены параллельно. Определить их эквивалентную емкость.

1.55. Два керамических конденсатора переменной емкости $C1$ и $C2$, изменяющейся соответственно от 10 до 100 пФ и от 75 до 200 пФ, соединены: а) параллельно:, б) последовательно. Определить минимальное и максимальное значения эквивалентной емкости каждого соединения.

1.56. Три конденсатора емкостями $C1=47$ пФ, $C2=18$ пФ, $C3=75$ пФ соединены параллельно, и к ним последовательно подключен конденсатор $C4=75$ пФ. Определить общую емкость цепи и эквивалентную емкость конденсаторов, если конденсатор $C4$ подсоединить параллельно.

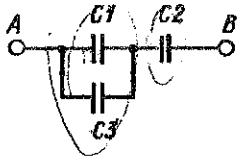

Рис. 1.1

1.57. На рис. 1.1 представлена схема соединения конденсаторов, где $C1=C2=1$ мкФ, $C3=2$ мкФ. Определить эквивалентную емкость.

1.58. Определить эквивалентную емкость соединения конденсаторов, представленную на рис. 1.2, при условии, что $C=1{,}5$ мкФ.

1.59*. На рис. 1.3 представлена схема смешанного соединения конденсаторов. Определить эквивалентную емкость цепи и энергию электрического поля, если $C=12$ мкФ и напряжение на входе $U=50$ В.

1.60. Определить эквивалентную емкость между зажимами AB и DE конденсаторов, соединенных по мостовой схеме (рис. 1.4), если $C1=C2=1$ мкФ, $C3=C4=3$ мкФ.

1.61*. Определить эквивалентную емкость батареи конденсаторов, соединенных по схеме рис. 1.5, при положениях ключей *Кл1*, *Кл2*, *Кл3* в соответствии с табл. 1.1. Значения емкостей конденсаторов: $C1=2$ мкФ, $C2=C3=C4=C6=1$ мкФ, $C5=3$ мкФ, $C7=0{,}5$ мкФ.

Таблица 1.1

Ключи	Позиции							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Кл1	0	1	0	0	1	1	0	1
Кл2	0	0	1	0	1	0	1	1
Кл3	0	0	0	1	0	1	1	1

Примечание. 0 в таблице — ключ в положении «Выкл», 1 — ключ в положении «Вкл».

1.62. К последовательно соединенным конденсаторам емкостями $C1=4$ мкФ и $C2=1$ мкФ приложено напряжение $U=150$ В. Определить заряд, напряжение и энергию электрического поля каждого конденсатора.

1.63. Напряжение на зажимах двух последовательно соединенных конденсаторов $C1$ и $C2$ равно 100 В.

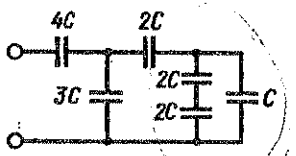

Рис. 1.2

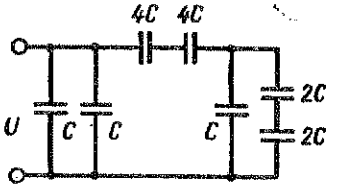

Рис. 1.3

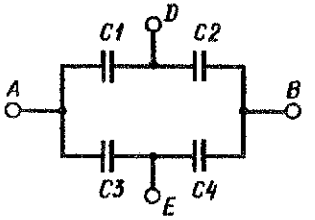

Рис. 1.4

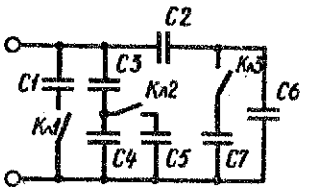

Рис.1.5

Определить емкость конденсатора $C2$ и их общую емкость, если падение напряжения на нем $U=40$ В, а емкость конденсатора $C1=0{,}05$ мкФ.

1.64. Общая емкость двух последовательно соединенных конденсаторов $C_{об}=18$ мкФ. Определить емкость каждого конденсатора, если напряжение на зажимах цепи $U=450$ В, а на конденсаторе $C1$ $U_1=150$ В.

1.65*. Два конденсатора емкостями $C1=0{,}02$ мкФ и $C2=0{,}08$ мкФ соединены последовательно и подключены к источнику питания. При этом на обкладках конденсаторов появился заряд $Q=5{,}6\cdot10^{-6}$ Кл. Определить общую емкость этого соединения, напряжение на его зажимах и на каждом из конденсаторов.

1.66. Два последовательно соединенных конденсатора $C1$ и $C2$ общей емкостью 4000 пФ подключены к источнику питания. Определить напряжение на каждом конденсаторе и напряжение источника, если энергия первого конденсатора $W_1=86\cdot10^{-6}$ Дж, а его емкость $C1=5600$ пФ.

1.67*. Два конденсатора $C1$ и $C2$ соединены параллельно, и к ним подведено напряжение $U=450$ В. Определить эквивалентную емкость, емкости $C1$ и $C2$ и их заряд, если $C2=4C1$, а энергия электрического поля эквивалентной емкости $W=28\cdot10^{-3}$ Дж.

1.68. Три конденсатора емкостями $C1=2$ мкФ, $C2=3$ мкФ, $C3=4$ мкФ соединены параллельно, и к ним подведено напряжение $U=27$ В. Определить заряд каждого конденсатора и энергию электрического поля всей батареи.

1.69*. Конденсаторы емкостями $C1=0{,}04$ мкФ, $C2=0{,}01$ мкФ и $C3=0{,}03$ мкФ соединены параллельно и подключены к источнику питания. При этом

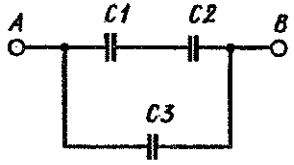

Рис. 1.6

общий заряд цепи $Q=6\cdot10^{-5}$ Кл. Определить напряжение источника, заряд каждого из конденсаторов и полную энергию электрического поля.

1.70*. Конденсатор емкостью $C1=1$ мкФ последовательно подключен к двум конденсаторам емкостями $C2=2{,}5$ мкФ и $C3=1{,}5$ мкФ, соединенным параллельно. При подключении этой цепи к источнику питания на ее зажимах установился заряд $Q=192\cdot10^{-6}$ Кл. Определить напряжение питания, напряжение и энергию электрического поля каждого конденсатора, а также энергию электрического поля всей цепи.

1.71. К зажимам AB конденсаторов, соединенных в соответствии с рис. 1.1, подведено напряжение $U=300$ В. Определить напряжение, подведенное к каждому из конденсаторов, и заряд, если $C1=C2=1$ мкФ, $C3=2$ мкФ.

1.72*. Конденсаторы $C1$, $C2$, $C3$ соединены по схеме рис. 1.6. К клеммам AB схемы приложено напряжение $U_{AB}=500$ В. Под действием электрического поля на обкладках конденсаторов $C1$ и $C2$ образуется заряд $Q_1=Q_2=4\cdot10^{-4}$ Кл, емкость конденсатора $C3=3$ мкФ. Определить эквивалентную емкость, емкости конденсаторов $C1$ и $C2$, заряд Q_3, напряжения U_1 и U_2 и энергию электрического поля, если $U_1=3U_2$.

1.73*. Два конденсатора емкостями $C1=3$ мкФ и $C2=2$ мкФ зарядили до напряжений $U_1=100$ В, $U_2=40$ В, а затем их соединили параллельно одноименными полюсами. Определить напряжение на зажимах конденсаторов для такого соединения. Чему равно это напряжение, если конденсаторы соединить параллельно, но разноименными полюсами?

1.74*. Два конденсатора емкостями $C1=0{,}08$ мкФ и $C2=0{,}02$ мкФ заряжены до напряжений $U_1=25$ В и $U_2=60$ В. Определить заряд каждого конденсатора и общий заряд цепи после соединения этих конденсаторов параллельно разноименными выводами. Определить напряжение на зажимах цепи, если конденсаторы соединить одноименными полюсами, а также энергию электрического поля для этих двух соединений.

КАЧЕСТВЕННЫЕ ЗАДАЧИ

1.75. Сила, с которой поле действует на точечный заряд Q, равна F. Как изменится напряженность поля, если силу уменьшить в два раза, а заряд увеличить в три раза?

1.76. Как изменится напряженность поля в точке, отстоящей от заряда Q на расстоянии r, если заряд удалить от этой точки на расстояние $2r$? $5r$?

1.77. Заряд Q удален от точки, где определяется напряженность E на расстояние r. Заряд увеличили вдвое, а расстояние уменьшили вдвое. Как изменится напряженность в этой точке по сравнению с первоначальной? (Среда остается той же.)

1.78. Точка, где определяется напряженность электрического поля E от действия точечного заряда Q в вакууме, находится на расстоянии r от этого заряда. Как надо изменить точечный заряд, помещенный в воду, чтобы в точке, отстоящей на том же расстоянии r от заряда Q, напряженность поля не изменилась?

1.79. Напряженность электрического поля в точке, отстоящей от положительного заряда на расстоянии r, равна E. Какова напряженность в точке, отстоящей от того же заряда на расстоянии: а) $3r$; б) $r/4$; в) $0{,}2r$?

1.80. Электрический заряд Q создает в точке, отстоящей от него на расстоянии r в вакууме, напряженность E. Как изменится напряженность поля, если заряд поместить: а) в воду; б) в спирт и уменьшить расстояние в два раза; в) в парафин и увеличить расстояние в пять раз?

1.81. Точечный заряд Q создает в точке, находящейся на расстоянии r от него, напряженность поля E. Заряд помещен в керосин. Как изменится напряженность поля, если керосин заменить спиртом, а расстояние r увеличить в три раза?

1.82. Сила взаимодействия двух зарядов Q_1 и Q_2, помещенных в стекло, равна F. Как изменится сила взаимодействия этих зарядов, если их переместить: а) в вакуум; б) в воду и одновременно увеличить расстояние между ними в два раза?

1.83. В вершины равностороннего треугольника помещены три одинаковых заряда: Q_1 и Q_2 и Q_3. Найти графически силу, действующую на заряд Q_1, если: а) все заряды положительные; б) все заряды

отрицательные:, в) Q_1 — положительный, Q_2 и Q_3 — отрицательные; г) Q_1 — положительный, Q_2 и Q_3 — разнополярные; д) Q_1 — отрицательный, Q_2 и Q_3 — разнополярные.

1.84. Сила взаимодействия двух одинаковых точечных зарядов, находящихся на расстоянии r друг от друга, равна F. Как она изменится, если уменьшить расстояние между зарядами в два раза и одновременно уменьшить один из зарядов тоже вдвое?

1.85. Два одноименных положительных заряда Q_1 и Q_2 находятся на расстоянии r друг от друга. Найти напряженность электрического поля в точке, находящейся посередине между ними, если: а) $Q_1 = Q_2$; б) $Q_1 = 2Q_2$. Определить направление вектора напряженности.

1.86. Определить графически напряженность электрического поля в точке, находящейся посередине между двумя одинаковыми: а) отрицательными; б) разноименными зарядами. Записать выражение для определения напряженности поля в этой точке для обоих случаев. Как изменится напряженность: а) при увеличении расстояния между зарядами в четыре раза; б) при уменьшении расстояния в два раза?

1.87. Определить графически напряженность поля в точке, находящейся в вершине равностороннего треугольника, если в две другие помещены: а) одноименные заряды $Q_1 = Q_2$; б) разноименные и $Q_1 = 2Q_2$; в) одноименные и $Q_1 = 0{,}1Q_2$. Среда во всех случаях постоянна.

1.88. Чему равна напряженность электрического поля в точке, находящейся в центре квадрата, если в его вершины помещены одинаковые: а) одноименные заряды; б) в двух соседних вершинах — положительные, в двух других — отрицательные; в) в двух противоположных вершинах — положительные, в двух других — отрицательные; г) в трех вершинах — положительные, в четвертой — отрицательный? Среда во всех случаях неизменна.

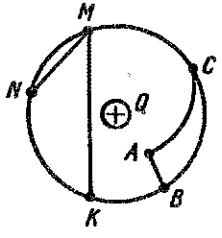

Рис. 1.7

1.89. На рис. 1.7 показаны пути перемещения заряда, находящегося в поле точечного заряда Q из точки A в точки B и C. Сравнить работу по перемещению этого заряда A_{AB} и A_{AC}.

1.90. Сравнить работу по перемещению заряда из точки M в точки N и K электростатического поля заряда Q (рис. 1.7).

1.91. Из одной точки электрического поля в другую, находящуюся на расстоянии l от нее, перемещается под действием сил этого поля, имеющего напряженность E, заряд Q. Как изменится работа по перемещению этого же заряда на то же расстояние, если напряженность поля уменьшится до $0{,}1E$? Как при этом изменится разность потенциалов в этих точках?

1.92. Напряжение между двумя зажимами источника равно U. Записать выражение для определения работы, затрачиваемой на перемещение заряда Q. Как изменится работа, если напряжение увеличить в три раза, а заряд при этом увеличить в два раза?

1.93. Напряжение на разомкнутых зажимах источника $U = 27$ В. Определить потенциалы зажимов «+» и «−» источника при заземленных зажимах «−» и «+».

1.94. В электрическое поле помещены три диэлектрика: слюда, стекло, янтарь. Какой из диэлектриков сильнее ослабляет электрическое поле?

1.95. Напряженность электрического поля $E = 10$ кВ. В него помещают поочередно диэлектрики — слюду, фарфор, стекло. Определить напряженность поля в каждом случае.

1.96. Как зависит пробивное напряжение диэлектрика от его толщины при постоянном приложенном к нему напряжении?

1.97. При каких условиях диэлектрик может стать проводником?

1.98. Между обкладками плоского воздушного конденсатора вводят тонкую пластину параллельно обкладкам. Как изменится при этом емкость конденсатора?

1.99. Как изменится емкость плоского воздушного конденсатора, если параллельно его обкладкам в воздушный промежуток ввести металлическую пластину, соизмеримую по толщине с шириной этого промежутка?

1.100. Плоский воздушный конденсатор подсоединен к источнику и заряжен до напряжения U. Как изменится напряженность поля конденсатора, если в воздушный промежуток между его обкладками

вставить пластину из слюды с толщиной, равной ширине этого промежутка?

1.101. Плоский воздушный конденсатор был заряжен до напряжения U и отсоединен от источника. В воздушный промежуток вставили пластину из диэлектрика с диэлектрической проницаемостью ε той же толщины, что и ширина этого промежутка. Как при этом изменится напряженность поля конденсатора?

1.102. Расстояние между пластинами воздушного конденсатора d, при этом его емкость равна C. Как изменится емкость конденсатора, если: а) расстояние между пластинами увеличить в два раза; б) площадь пластин уменьшить в три раза и расстояние — в два раза; в) расстояние между пластинами увеличить в два раза, а в качестве диэлектрика использовать стекло?

1.103. Емкость плоского воздушного конденсатора C. Как должна быть изменена площадь пластин при введении между ними диэлектрика с проницаемостью ε, чтобы емкость конденсатора осталась постоянной при неизменном расстоянии между пластинами?

1.104. Как изменится емкость плоского конденсатора, если его обкладки раздвинуть?

1.105. Как зависит емкость плоского конденсатора от материала и толщины обкладок?

1.106. Плоский воздушный конденсатор подключен к источнику питания с напряжением U. Как изменится напряженность электрического поля конденсатора, если между его пластинами ввести любой твердый диэлектрик толщиной, равной ширине воздушного зазора?

1.107. Плоский воздушный конденсатор заряжен от источника питания до напряжения U и затем отсоединен от него. Как изменится напряженность электрического поля конденсатора, если между его пластинами поместить диэлектрик толщиной, равной ширине воздушного зазора?

1.108. Как изменятся емкость конденсатора и его заряд, если напряжение, приложенное к конденсатору: а) увеличить в два раза;, б) уменьшить в пять раз?

1.109. Плоский воздушный конденсатор подсоединен к источнику. Как изменится энергия электрического поля конденсатора, если в качестве диэлектрика использовать стекло?

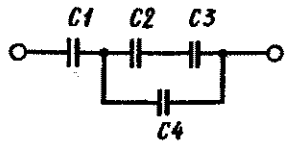

Рис. 1.8

1.110. Как изменится энергия электрического поля воздушного конденсатора, подключенного к источнику с напряжением U, если: а) уменьшить расстояние между обкладками; б) увеличить это расстояние?

1.111. Плоский воздушный конденсатор зарядили до напряжения U и отсоединили от источника, после чего увеличили расстояние между пластинами вдвое. Как при этом изменится энергия электрического поля?

1.112. К двум последовательно включенным конденсаторам $C1$ и $C2$ подведено напряжение U. Определить в общем виде эквивалентную емкость и падение напряжения на каждом конденсаторе, если $C2=4C1$.

1.113. К трем последовательно соединенным конденсаторам одинаковой емкости C подведено напряжение U. Как изменится распределение напряжения на каждом из конденсаторов, если один конденсатор закоротить? Сравнить энергию электрического поля для этих двух случаев.

1.114. На рис. 1.8 представлена схема соединения конденсаторов емкостью C каждый. Найти в общем виде эквивалентную емкость такого соединения. Как изменится эквивалентная емкость, если закоротить конденсатор $C2$?

Глава 2

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ И УРАВНЕНИЯ

Закон Ома. Сопротивление. Электрический ток — это направленное движение носителей зарядов. Ток определяется количеством электричества (зарядом), проходящим через поперечное сечение проводника в единицу времени:

$$I=Q/t. \qquad (2.1)$$

Единицей тока является ампер (А):

$$1\text{А} = 1\ \text{Кл}/1\text{с}.$$

Плотность тока (А/мм^2)

$$J = I/S, \qquad (2.2)$$

где I — ток в проводнике; А; S — площадь поперечного сечения, мм^2.

Закон Ома для участка цепи: *ток, проходящий по участку цепи, прямо пропорционален напряжению U, приложенному к этому участку, и обратно пропорционален его сопротивлению R*, т. е.

$$I = U/R, \qquad (2.3)$$

где U — в вольтах (В); R — в омах (Ом).

Закон Ома для всей цепи

$$I = E/(R+r), \qquad (2.4)$$

где E — электродвижущая сила источника электрической энергии, В; R — сопротивление внешней цепи, Ом; r — внутреннее сопротивление источника, Ом.

Электрическое сопротивление проводника

$$R = U/I.$$

Величину, обратную сопротивлению, называют проводимостью G и выражают в сименсах (См), 1 См = 1/Ом:

$$G = 1/R. \qquad (2.5)$$

Сопротивление провода

$$R = \rho\frac{l}{S}, \qquad (2.6)$$

где ρ — удельное сопротивление, Ом · мм^2/м; l — длина проводника, м; S — площадь его поперечного сечения, мм^2.

Величину, обратную удельному сопротивлению, называют удельной проводимостью [м/(Ом · мм^2)]:

$$\nu = 1/\rho. \qquad (2.7)$$

Сопротивление проводника зависит от температуры

$$R_2 = R_1[1+\alpha(\Theta_2-\Theta_1)], \qquad (2.8)$$

где R_1 — сопротивление проводника при температуре Θ_1, Ом; R_2 — сопротивление проводника при температуре Θ_2, Ом; α — температурный коэффициент

сопротивления, численно равный относительному приращению сопротивления при нагревании проводника на 1 °С.

Энергия и мощность электрической цепи. Работа (энергия W), затраченная на перенос заряда Q на участке цепи за время t,

$$A = W = UQ, \text{ или } A = W = UIt, \qquad (2.9)$$

где A — в джоулях (Дж).

Работа, совершенная источником электрической энергии с ЭДС E,

$$A = EQ \text{ или } A = EIt. \qquad (2.10)$$

Мощность, потребляемая нагрузкой,

$$P = A/t = UI = RI^2 = U^2/R, \qquad (2.11)$$

где P — в ваттах (Вт).

Мощность, развиваемая источником или генератором,

$$P_г = EI. \qquad (2.12)$$

По закону сохранения энергии мощность генератора равна сумме мощностей потребителей. Это равенство называют балансом мощностей в электрических цепях:

$$P_г = \sum PEI = \sum I^2R_i.$$

Закон Джоуля — Ленца. Количество теплоты (Дж), выделенное при прохождении постоянного тока в проводнике,

$$Q = I^2Rt, \qquad (2.13)$$

или

$$Q = 0{,}24I^2Rt, \qquad (2.14)$$

где Q — в калориях.

Последовательное, параллельное и смешанное соединения резисторов. Эквивалентное сопротивление ряда последовательно соединенных резисторов равно сумме их сопротивлений:

$$R = R_1 + R_2 + \ldots + R_n. \qquad (2.15)$$

Параллельным называют такое соединение резисторов, при котором между двумя узлами электрической цепи присоединено несколько резисторов. Эквивалентная проводимость этого участка цепи

равна сумме проводимостей всех параллельных ветвей:

$$G=G_1+G_2+...+G_n, \qquad (2.16)$$

или

$$\frac{1}{R}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+...+\frac{1}{R_n}. \qquad (2.17)$$

При параллельном соединении n ветвей с равными сопротивлениями в каждой ветви, т. е. $R_1=R_2=...=R_n$,

$$R=R_n/n. \qquad (2.18)$$

При параллельном соединении двух резисторов R_1 и R_2 их эквивалентное сопротивление

$$R=R_1R_2/(R_1+R_2). \qquad (2.19)$$

Смешанное соединение резисторов — это последовательно-параллельное соединение резисторов или участков цепи.

Первый закон Кирхгофа. Сумма токов, направленных к узлу, равна сумме токов, направленных от узла, или алгебраическая сумма токов в узле равна нулю:

$$I_1+I_3+...+I_n=I_2+I_4+...+I_k, \qquad (2.20)$$

где I_1, I_3, ..., I_n — токи, направленные к узлу; I_2, I_4, ..., I_k — токи, направленные от узла, или

$$\sum I=0. \qquad (2.21)$$

Со знаком «+» записывают токи, направленные к узлу, со знаком «−» — от узла.

Второй закон Кирхгофа. В замкнутом контуре электрической цепи алгебраическая сумма ЭДС равна алгебраической сумме падений напряжений вдоль того же контура:

$$\sum E=\sum IR. \qquad (2.22)$$

При составлении уравнений по этому закону ЭДС источника записывают со знаком «+», если ее направление совпадает с выбранным направлением обхода контура. Падение напряжения записывают со знаком «+», если направление тока через резистор совпадает с выбранным направлением обхода контура.

Потеря напряжения в проводах линии электропередачи. Разность напряжений в начале и конце линии

U_1-U_2, равная падению напряжения в линии, называют потерей напряжения:

$$\Delta U=U_1-U_2=IR_{пр}, \qquad (2.23)$$

где $R_{пр}$ — сопротивление проводов в линии: $R_{пр}=\rho\frac{2l}{S}$ (l — длина одного провода двухпроводной линии, м; S — сечение провода, мм^2). Мощность потерь в линии (Вт)

$$\Delta P=I\Delta U=I^2R_{пр}. \qquad (2.24)$$

Коэффициент полезного действия линии

$$\eta=\frac{P_2}{P_1}=\frac{P_1-\Delta P}{P_1}=\frac{U_1I-\Delta UI}{U_1I}=1-\frac{\Delta U}{U_1}, \qquad (2.25)$$

или

$$\eta=\frac{P_2}{P_1}100\%,$$

где P_1 — мощность в начале линии, Вт; P_2 — мощность в конце линии, Вт.

ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ С РЕШЕНИЯМИ

2.1. Определить ЭДС генератора и его внутреннее сопротивление, если при мощности нагрузки $P_1=2{,}7$ кВт напряжение на зажимах генератора $U=225$ В, при мощности $P_2=1{,}84$ кВт напряжение $U=230$ В.

Решение. Определим токи, проходящие в нагрузке, для обоих случаев:

$$I_1=\frac{P_1}{U_1}=\frac{2{,}7\cdot10^3}{225}=12\text{A},$$

$$I_2=\frac{P_2}{U_2}=\frac{1{,}84\cdot10^3}{230}=8\text{A}.$$

Воспользуемся законом Ома для всей цепи: $I=E/(R+r)$ или $E=IR+Ir$ и запишем два уравнения (для двух режимов работы цепи):

$$E=I_1R+I_1r=225+12r,$$

$$E=I_2R+I_2r=230+8r.$$

Решая эту систему уравнений, определяем E и r: $E=240$ В, $r=1{,}25$ Ом.

2.2. К источнику постоянного тока напряжением $U=150$ В подключена нагрузка, состоящая из четырех параллельных ветвей. Мощность, потребляемая каждой ветвью, соответственно $P_1=90$ Вт, $P_2=270$ Вт, $P_3=157{,}5$ Вт, $P_4=360$ Вт.. Определить проводимость и ток каждой ветви, общую проводимость и эквивалентное сопротивление нагрузки, ток в неразветвленной части цепи.

Решение. Зная мощность и ток каждой ветви, при заданном значении входного напряжения можно записать $P=UI=U^2G$, так как ток в каждой параллельной ветви $I=UG$.

Тогда

$$G_1=90/150^2=4\cdot10^{-3}\ \text{Ом}^{-1},$$
$$G_2=270/150^2=12\cdot10^{-3}\ \text{Ом}^{-1},$$
$$G_3=157{,}5/150^2=7\cdot10^{-3}\ \text{Ом}^{-1},$$
$$G_4=360/150^2=16\cdot10^{-3}\ \text{Ом}^{-1}.$$

Эквивалентная проводимость нагрузки

$$G=G_1+G_2+G_3+G_4=39\cdot10^{-3}\ \text{Ом}^{-1}.$$

Эквивалентное сопротивление нагрузки

$$R=1/G=1/(39\cdot10^{-3})=25{,}6\ \text{Ом}.$$

Токи в ветвях определим по формуле $I=UG$:

$$I_1=UG_1=150\cdot4\cdot10^{-3}=0{,}6\text{А},$$
$$I_2=UG_2=150\cdot12\cdot10^{-3}=1{,}8\text{А},$$
$$I_3=UG_3=150\cdot7\cdot10^{-3}=1{,}05\text{А},$$
$$I_4=UG_4=150\cdot16\cdot10^{-3}=2{,}4\text{А}.$$

Ток в неразветвленной части цепи

$$I=UG=150\cdot39\cdot10^{-3}=5{,}85\text{А},$$

или

$$I=I_1+I_2+I_3+I_4=0{,}6+1{,}8+1{,}05+2{,}4=5{,}85\text{А}.$$

2.3. На нагревательном элементе в течение 0,5 ч работы выделилось 550 ккал теплоты. Определить сопротивление элемента, потребляемый им ток, его мощность и затрачиваемую энергию при напряжении $U=220$ В.

Решение. По закону Джоуля—Ленца,

$$Q=0{,}24UIt,$$

откуда

$$I=\frac{Q}{0{,}24Ut}=\frac{550\cdot10^3}{0{,}24\cdot220\cdot1800}=5{,}8\text{А}.$$

Сопротивление нагревателя

$$R=U/I=220/5{,}8=38\ \text{Ом}.$$

Мощность нагревателя

$$P=UI=220\cdot5{,}8=1270\ \text{Вт}=1{,}27\ \text{кВт}.$$

Энергия, потребляемая за 0,5 ч работы,

$$W=Pt=1{,}27\cdot0{,}5=0{,}635\ \text{кВт}\cdot\text{ч}.$$

2.4. Два источника постоянного тока, соединенные параллельно, имеют $E_1=11{,}5$ В, $r_1=2{,}5$ Ом, $E_2=16{,}5$ В, $r_2=6$ Ом и нагрузочный резистор сопротивлением $R_н=30$ Ом. Определить значения и направления токов через источники и нагрузку. Составить баланс мощностей. Указать режим работы каждого источника и определить падение напряжения на зажимах источников.

Решение. На рис. 2.1 представлена схема соединения указанных элементов. Выбранное направление токов показано стрелками.

В соответствии с первым законом Кирхгофа

$$I_2=I_1+I_н.$$

Для двух независимых контуров составим два уравнения по второму закону Кирхгофа.

Для контура, включающего в себя два источника E_1 и E_2, выбираем направление обхода против часовой стрелки и записываем

$$E_2-E_1=I_1r_1+I_2r_2.$$

Для контура с источником E_2 и сопротивлением нагрузки $R_н$ при обходе по часовой стрелке

$$E_2=I_нR_н+I_2r_2.$$

Имеем систему из трех уравнений с тремя неизвестными: I_1, I_2 и $I_н$. Подставив в них значение ЭДС и сопротивлений и решив эту систему, находим: $I_1=0{,}3$А, $I_2=0{,}71$А, $I_н=0{,}41$А.

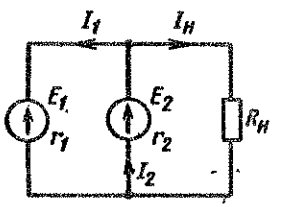

Рис. 2.1

Источник E_1 работает в режиме потребителя, а E_2 — ге-

нератора, поэтому при составлении баланса мощностей необходимо помнить, что мощность ЭДС E_1 отрицательна.

Баланс мощностей — это равенство мощностей, отдаваемых генераторами, и мощностей потребителей, т. е.

$$E_2I_2 - E_1I_1 = I_1^2r_1 + I_2^2r_2 + I_н^2R_н,$$

$$16{,}5 \cdot 0{,}71 - 11{,}5 \cdot 0{,}3 = (0{,}3)^2 \cdot 2{,}5 + (0{,}71)^2 \cdot 6 + (0{,}41)^2 \cdot 30,$$

$$11{,}7 \text{ Вт} \approx 11{,}72 \text{ Вт}.$$

Падение напряжения на зажимах источников можно определить тремя способами:

а) $U = I_нR_н = 0{,}41 \cdot 30 = 12{,}3$ В;

б) $U = E_2 - I_2r_2 = 16{,}5 - 0{,}71 \cdot 6 = 12{,}24$ В;

в) $U = E_1 + I_1r_1 = 11{,}5 + 0{,}3 \cdot 2{,}5 = 12{,}25$ В.

2.5. Двухпроводная линия питается от источника мощностью $P = 2{,}5$ кВт при токе потребления $I = 12$ А. Определить мощность нагрузки, потерю напряжения и КПД линии, если ее длина составляет $l = 1200$ м, а диаметр медных проводов $d = 4{,}5$ мм.

Решение. Определим сопротивление проводов линии:

$$R_{пр} = \rho\frac{2l}{S} = \rho\frac{2l \cdot 4}{\pi d^2} = 0{,}0175\frac{2 \cdot 1200 \cdot 4}{3{,}14 \cdot 4{,}5^2} = 2{,}64 \text{ Ом}.$$

Зная ток в линии, определим потерю напряжения в ней: $\Delta U = R_{пр}I = 2{,}64 \cdot 12 = 31{,}7$ В. Мощность в линии: $\Delta P_л = \Delta UI = 31{,}7 \cdot 12 = 380$ Вт.

Мощность, потребляемая нагрузкой,

$$P_н = P_{ист} - \Delta P_л = 2500 - 380 = 2120 \text{ Вт} = 2{,}12 \text{ кВт}.$$

Коэффициент полезного действия линии

$$\eta = \frac{P_н}{P_{ист}} 100\% = \frac{2{,}12}{2{,}5} 100\% = 85\%.$$

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

2.6. Через проводник в течение 0,5 ч проходит заряд $Q = 2700$ Кл. Определить ток в электрической цепи.

2.7. Определить время прохождения заряда $Q = 0{,}6$ Кл по проводнику при заданном значении

тока: 1) $I = 0{,}5$ А; 2) $I = 0{,}03$ А; 3) $I = 2$ мА; 4) $I = 15$ А; 5) $I = 50$ мА; 6) $I = 2$ А.

2.8. Через поперечное сечение проводника $S = 2{,}5$ мм^2 за время $t = 0{,}04$ с прошел заряд $Q = 20 \cdot 10^{-3}$ Кл. Определить плотность тока в проводнике.

2.9. По проводнику с поперечным сечением $S = 0{,}24$ мм^2 проходит ток, плотность которого $J = 5$ А/мм^2. Определить ток и заряд, прошедшие через проводник за время: 1) 0,005 с; 2) 1 с; 3) 100 мкс; 4) 20 мс; 5) 0,4 с; 6) 5 с.

2.10. Определить сопротивление провода, имеющего длину $l = 150$ м и диаметр $d = 0{,}2$ мм, выполненного из: 1) константана; 2) латуни; 3) стали; 4) фехраля; 5) платины; 6) алюминия.

2.11. Определить длину медного изолированного провода, если его диаметр $d = 0{,}3$ мм, а сопротивление $R = 82$ Ом.

2.12. Сопротивление манганинового провода при $\Theta = 20$ °С $R1 = 500$ Ом, а при $\Theta = 280$ °С $R2 = 500{,}8$ Ом. Определить температурный коэффициент манганина.

2.13. Сопротивление R датчика, выполненного из медного провода, при $\Theta = 20$ °С составляет 25 Ом. Определить измеренную с его помощью температуру, если сопротивление датчика возросло до 32,8 Ом.

2.14. Определить материал проводника, если его сопротивление при $\Theta = 20$ °С составляет 400 Ом, а при $\Theta = 75$ °С равно 503,2 Ом.

2.15. Сопротивление провода $R = 2{,}35$ Ом при длине $l = 150$ м и диаметре $d = 1{,}5$ мм. Определить материал провода.

2.16. Определить длину провода диаметром $d = 0{,}5$ мм для нагревательного элемента при включении его в сеть с напряжением $U = 220$ В при токе потребления $I = 6{,}5$ А, выполненного из: 1) нихрома; 2) константана; 3) стали; 4) фехраля; 5) алюминия; 6) манганина. Определить плотность тока.

2.17. Определить длину медного провода, намотанного на катушку, если при подаче на выводы этой катушки напряжения $U = 27$ В значение тока I составило 5 А. Диаметр провода $d = 0{,}8$ мм. Определить плотность тока.

2.18. Определить необходимую длину нихромового провода диаметром $d = 0{,}1$ мм для изготовления паяльника мощностью $P = 80$ Вт на напряжение $U = 220$ В.

2.19. Медный провод диаметром $d=1{,}2$ мм имеет длину $l=120$ м. Определить его сопротивление при $\Theta=20$ °С и $\Theta=80$ °С.

2.20. Сопротивление R обмотки трансформатора до его включения в сеть при $\Theta=20$ °С было равно 2,0 Ом. Определить температуру нагрева его обмотки в процессе работы, если ее сопротивление увеличилось до 2,28 Ом. Обмотка выполнена из медного провода.

2.21. При испытании двигателя постоянного тока измерили сопротивление обмотки якоря до начала работы двигателя при $\Theta=18$ °С. Обмотка выполнена из меди, и ее сопротивление $R=0{,}52$ Ом. По окончании работы сопротивление якоря увеличилось до 0,58 Ом. Определить температуру нагрева якорной обмотки.

2.22. При нагревании сопротивление провода из: 1) алюминия; 2) латуни; 3) нихрома; 4) стали; 5) фехраля; 6) вольфрама — изменилось на 5%. Определить, до какой температуры был нагрет каждый проводник, если $\Theta_1=20$ °С.

2.23. Определить сопротивление резистора и напряжение, подведенное к нему, если потребляемый ток $I=3{,}5$ А, а количество теплоты, выделившееся на резисторе в течение 1 ч, $Q=81{,}65$ ккал.

2.24. Нагревательный элемент сопротивлением $R=15$ Ом подключен к источнику напряжением $U=120$ В. Определить время, на которое необходимо его включить, чтобы выделилось 1200 кДж теплоты. Определить также потребляемый им ток и стоимость электроэнергии, если 1 кВт·ч стоит 4 коп.

2.25. Электропечь, работающая при напряжении $U=200$ В, потребляет мощность $P=3$ кВт. Определить сопротивление и ток в обмотке, количество теплоты и стоимость электроэнергии, если печь работала в течение 8 ч. Стоимость 1 кВт·ч электроэнергии — 2 коп.

2.26. При зарядке аккумуляторной батареи в течение времени $t=4$ ч 45 мин при напряжении $U=220$ В была затрачена энергия $W=5{,}5$ кВт·ч. Определить ток зарядки батареи и потребляемую ею мощность.

2.27. Определить время, необходимое для зарядки аккумулятора с внутренним сопротивлением $r=10$ Ом, если напряжение, подведенное к батарее, $U=24$ В, а энергия $W=0{,}37$ кВт·ч.

2.28. Определить эквивалентное сопротивление на зажимах AB схемы рис. 2.2, где $R1=0{,}5$ Ом, $R2=5$ Ом, $R3=9$ Ом.

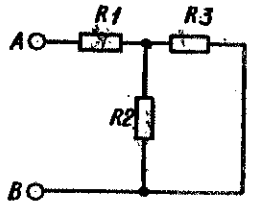

Рис. 2.2

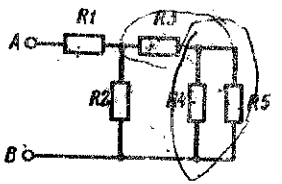

Рис. 2.3

2.29. Определить эквивалентное сопротивление электрической цепи, представленной на рис. 2.3, если $R1=2{,}5$ Ом, $R2=6$ Ом, $R3=2$ Ом, $R4=1{,}5$ Ом, $R5=3$ Ом.

2.30. На рис. 2.4 представлена схема электрической цепи, где $R1=R2=15$ Ом, $R3=R6=20$ Ом, $R4=R5=17{,}5$ Ом, $R7=12$ Ом. Определить эквивалентное сопротивление цепи между зажимами AB, CD.

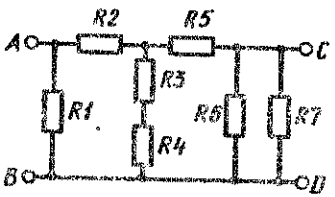

Рис. 2.4

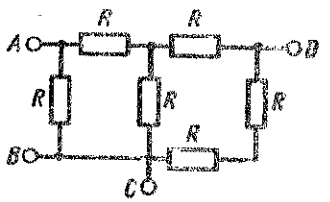

Рис. 2.5

2.31. Определить в общем виде сопротивление электрической цепи, представленной на рис. 2.5, относительно зажимов AB, BC, CD.

2.32. В схеме рис. 2.6 значения сопротивлений резисторов одинаковы и равны R. Определить в общем виде значения сопротивлений между зажимами AB, AC, AD, CD, EF.

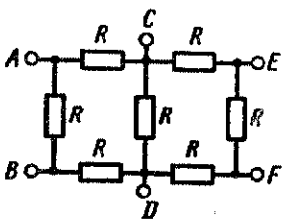

Рис. 2.6

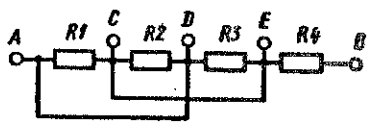

Рис. 2.7

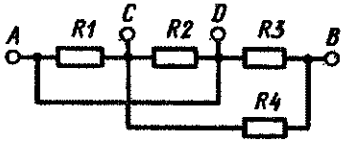

Рис. 2.8

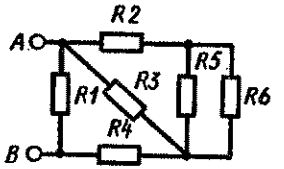

Рис. 2.9

2.33. Для электрической цепи, представленной на рис. 2.7, определить сопротивления на участках цепи *AB*, *DE* и *AE* в общем виде, если $R1=R2=R3=R4=R$.

2.34. Определить сопротивление электрической цепи между зажимами *AB* (рис. 2.8), если $R1=R2=4$ Ом, $R3=6$ Ом, $R4=10$ Ом. Как изменится эквивалентное сопротивление цепи, если закоротить точки: а) *C* и *D*; б) *A* и *C*; в) *C* и *B*; г) *D* и *B*?

2.35. Определить эквивалентное сопротивление электрической цепи, представленной на рис. 2.9, где $R1=R5=3$ Ом; $R2=2{,}8$ Ом; $R3=1$ Ом; $R4=6{,}2$ Ом; $R6=2$ Ом.

2.36. При заданных проводимостях четырех параллельных ветвей $G_1=0{,}11$ Ом$^{-1}$; $G_2=0{,}03$ Ом$^{-1}$; $G_3=0{,}07$ Ом$^{-1}$; $G_4=0{,}04$ Ом$^{-1}$ определить эквивалентную проводимость и эквивалентное сопротивление цепи.

2.37. Для электрической цепи, представленной на рис. 2.10, определить общую проводимость цепи, если $R1=25$ Ом, $R2=50$ Ом, $R3=40$ Ом и $R4=60$ Ом.

2.38. В схеме электрической цепи, представленной на рис. 2.11, задано значение эквивалентной проводимости цепи $G=0{,}025$ Ом$^{-1}$. Определить проводимость G_1, если $G_2=0{,}01$ Ом$^{-1}$, $G_3=0{,}04$ Ом$^{-1}$.

2.39. Определить проводимости G_2 и G_3 электрической цепи, представленной на рис. 2.12, если $G_1=0{,}05$ Ом$^{-1}$, $G_4=0{,}2$ Ом$^{-1}$, $G_5=0{,}1$ Ом$^{-1}$ и $G=0{,}17$ Ом$^{-1}$. Проводимости $G_2=G_3$.

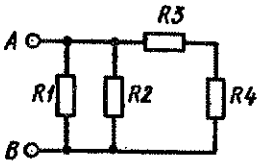

Рис. 2.10

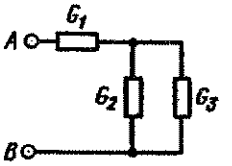

Рис. 2.11

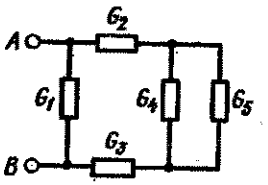

Рис. 2.12

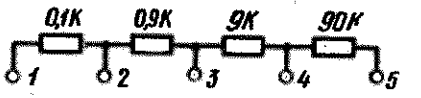

Рис. 2.13

2.40. На рис. 2.13 представлена схема делителя. Определить напряжение между зажимами *1—2*, *1—3*, *1—4*, если на вход делителя (зажимы *1—5*) подано напряжение $U=100$ В.

2.41*. Определить коэффициенты деления делителя, представленного на рис. 2.14, при отключенном тумблере *Кл*. Сопротивления резисторов делителя $R1=2$ кОм, $R2=18$ кОм; $R3=180$ кОм, $R4=225$ кОм. Определить коэффициенты деления делителя K_{1-2} и K_{1-3} при включенном тумблере *Кл*.

Примечание. Коэффициент деления делителя определяется отношением общего сопротивления делителя к сопротивлению указанного участка цепи.

2.42. К источнику постоянного тока с ЭДС $E=1{,}5$ В и внутренним сопротивлением $r=2{,}5$ Ом подключен резистор сопротивлением $R=10$ Ом. Определить ток в цепи и падение напряжения на источнике.

2.43. Напряжение на зажимах источника, нагруженного сопротивлением $R=250$ Ом, $U=4{,}5$ В. Напряжение на зажимах того же источника без нагрузки $U=4{,}77$ В. Определить внутреннее сопротивление источника.

2.44. Ток короткого замыкания источника $I_к=48$ А. При подключении к источнику резистора сопротивлением $R=19{,}5$ Ом ток I в цепи уменьшился до 1,2 А. Определить ЭДС источника и его внутреннее сопротивление.

2.45. Источник напряжения имеет ЭДС $E=4{,}5$ В и ток короткого замыкания $I_к=3{,}6$ А. Определить падение напряжения на нем и ток нагрузки, если он нагружен на резистор сопротивлением $R=5$ Ом.

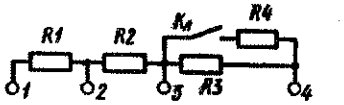

Рис. 2.14

2.46. Напряжение на зажимах источника при холостом

ходе $U_х = 250$ В. Напряжение на тех же зажимах при нагруженном источнике $U = 242$ В. Внутреннее сопротивление источника $r = 2{,}5$ Ом. Определить ток, сопротивление нагрузки и мощность, отдаваемую источником. Составить баланс мощностей.

2.47*. Источник постоянного тока с ЭДС $E = 12$ В и внутренним сопротивлением $r = 2$ Ом нагружен на резистор с переменным сопротивлением, изменяющимся от нуля до 30 Ом. Построить графики: 1) изменения мощности нагрузки $P_н$; 2) изменения относительной мощности $P_н / P_{ист}$ — при следующих значениях $R_н$: 0; 1; 2; 3; 4; 6; 8; 10; 14; 18; 22; 28; 30 Ом. Найти графически максимальное значение потребляемой мощности.

2.48. Источник ЭДС с внутренним сопротивлением $r = 0{,}10$ Ом нагружен на потребитель, на котором за 1 ч работы выделилось 729 кал при токе потребления $I = 0{,}75$ А. Определить ЭДС источника.

2.49*. Мощность, отдаваемая источником питания в режиме короткого замыкания, $P_к = 344$ Вт. Его внутреннее сопротивление $r = 2{,}2$ Ом. Определить значение ЭДС источника, сопротивление нагрузки при токе $I = 0{,}6$ А и мощность нагрузки. Составить баланс мощностей.

2.50. На резистор сопротивлением $R_н = 120$ Ом подано напряжение от источника ЭДС $E = 300$ В через реостат сопротивлением $R_р = 480$ Ом (рис. 2.15). Определить, в каких пределах можно изменять ток и напряжение в нагрузке с помощью реостата при: 1) замкнутом и 2) разомкнутом тумблере *Кл*. Внутренним сопротивлением источника пренебречь.

2.51. К источнику постоянного тока с ЭДС $E = 125$ В подключены последовательно три резистора сопротивлениями $R1 = 100$ Ом, $R2 = 30$ Ом, $R3 = 120$ Ом. Определить ток в цепи, падение напряжения и мощность на каждом резисторе. Внутренним сопротивлением источника пренебречь.

2.52. Резисторы *R1*, *R2* и *R3* соединены последовательно, и к ним подведено напряжение $U = 24$ В. На резисторе $R1 = 8$ Ом выделяется мощность $P = 4{,}5$ Вт. Определить сопротивления резисторов *R2* и *R3* и падение напряжения на каждом из них, если $R1 = 0{,}5R2$.

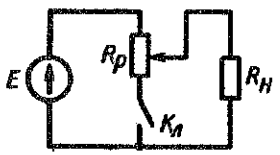

Рис. 2.15

2.53*. Нагрузкой источника с ЭДС $E = 27$ В ($r = 0$) является делитель, состоящий из трех резисторов: *R1*, *R2* и $R_д$. Ток, потребляемый цепью, $I = 2$ мА, падение напряжения на добавочном резисторе $R_д$ равно 5 В и $R1 = 10\ R2$. Определить сопротивления всех резисторов и потребляемую мощность.

2.54*. Источник постоянного тока с ЭДС $E = 300$ В нагружен на резистор сопротивлением $R = 2{,}5$ кОм. Ток потребителя необходимо менять от 10 до 100 мА с помощью последовательно включенного реостата. Определить максимальное и минимальное сопротивления реостата, мощность потребителя и реостата при максимальном и минимальном токах. Составить баланс мощностей.

2.55. Мощность, потребляемая последовательно соединенными резисторами *R1*, *R2*, *R3*, $P = 25$ Вт при токе цепи $I = 0{,}2$ А. На участке, где включены резисторы *R1* и *R2*, падение напряжения $U_{1-2} = 55$ *В*. Сопротивление резистора $R1 = 130$ Ом. Определить сопротивления *R2* и *R3*, напряжение на входе цепи и составить баланс мощностей.

2.56. Для электрической цепи, состоящей из источника постоянного тока с напряжением $U_{вх}$ и трех последовательно соединенных резисторов *R1*, *R2*, *R3*, заданы параметры в соответствии с табл. 2.1. Определить для каждого варианта указанные в таблице звездочкой параметры цепи и составить баланс мощностей.

Таблица 2.1

Варианты	*R1*, Ом	*R2*, Ом	*R3*, Ом	$R_{экв}$, Ом	$U_{вх}$, В	*I*, А	$P_{ист}$, Вт	U_1, В	U_2, В	U_3, В	P_1, Вт	P_2, Вт	P_3 Вт
1	*	16	60	*	50	0,5	*	*	*	*			
2	*	*	5	25	*	0,2		2	*	*			
3	*	*	*	*	15	*		3			12	16	*
4	*	10	*		30	*		*	*	6			9
5	*	2*R3*	*	40	*	*	10			4	*	*	
6	*R2*	*	2*R2*	*	*	3	36		*	*			*

2.57. Проводимости трех параллельных ветвей $G_1 = 0{,}012$ Ом$^{-1}$, $G_2 = 0{,}02$ Ом$^{-1}$, $G_3 = 0{,}016$ Ом$^{-1}$. Ток в неразветвленной части цепи $I = 4{,}8$ А. Определить приложенное напряжение, токи в ветвях и потребляемую мощность.

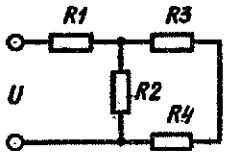

Рис. 2.16

2.58*. На вход электрической цепи, состоящей из четырех параллельных ветвей, подана мощность $P=1200$ Вт. Ток в первой ветви $I_1=0{,}7$ А, проводимости остальных ветвей: $G_2=0{,}002$ Ом$^{-1}$, $G_3=0{,}0005$ Ом$^{-1}$, $G_4=0{,}00325$ Ом$^{-1}$. Определить приложенное напряжение, ток в неразветвленной части цепи и во всех ветвях и проводимость первой ветви. Составить баланс мощностей.

2.59. К источнику с напряжением $U=300$ В подключены параллельно четыре лампы накаливания с сопротивлениями $R1=R2=1200$ Ом, $R3=500$ Ом; $R4=750$ Ом. Определить общее сопротивление и проводимость цепи, токи в лампах и общую потребляемую мощность.

2.60. На вход цепи (рис. 2.16) подано напряжение $U=27$ В. Определить токи на всех участках цепи и потребляемую цепью мощность, если $R1=40$ Ом, $R2=75$ Ом, $R3=70$ Ом, $R4=80$ Ом.

2.61. Определить сопротивление ламп накаливания при указанных на них мощностях $P=25$; 40; 60; 100; 150; 500 Вт и напряжении $U=220$ В.

2.62. Электронагревательный элемент потребляет мощность $P=770$ Вт при напряжении $U=220$ В. Определить ток, проходящий через этот элемент, его сопротивление и количество теплоты, выделившееся за 0,5 ч непрерывной работы.

2.63*. Падение напряжения на резисторе $R2$ (см. рис. 2.2) $U=28$ В. Ток в неразветвленной части цепи $I_1=0{,}085$ А. Определить сопротивления резисторов $R1$ и $R2$, токи в ветвях, входное напряжение и потребляемую цепью мощность, если сопротивление резистора $R3=800$ Ом, а общее сопротивление всей цепи $R=730$ Ом.

2.64. К зажимам AB схемы рис. 2.8 подано напряжение $U=120$ В. Определить значения токов во всех ветвях и в неразветвленной части цепи, падения напряжения на участках AC, CB, CD и DB, если $R1=900$ Ом, $R2=R3=300$ Ом, $R4=375$ Ом.

2.65. Для электрической цепи на рис. 2.8 заданы значения напряжения и тока на участке CB $U_{CB}=35$ В, $I_4=0{,}175$ А, сопротивления резисторов $R1=600$ Ом, $R2=450$ Ом и потребляемая цепью мощность $P=24$ Вт. Определить напряжение на входе цепи,

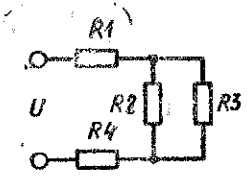

Рис. 2.17

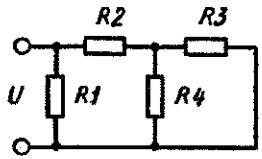

Рис. 2.18

токи во всех ветвях и сопротивления резисторов $R3$ и $R4$.

2.66*. Мощность, потребляемая цепью, представленной на рис. 2.8, $P=115{,}2$ Вт, мощность $P_{CD}=16$ Вт на участке CD, ток $I_4=2$ А, сопротивление резистора $R4=12$ Ом и отношение токов $I_2:I_1=4:1$. Определить сопротивления резисторов $R1$, $R2$, $R3$, токи в ветвях, входное напряжение и составить баланс мощностей.

2.67*. К входным зажимам электрической цепи (см. рис. 2.9) приложено напряжение $U=24$ В. Ток в неразветвленной части цепи $I=5{,}2$ А. Сопротивления резисторов $R3=1{,}0$ Ом, $R6=2$ Ом и ток $I_3=2{,}5$ А. Отношение напряжений $U_2:U_5=3:1$, а отношение токов $I_5:I_6=2:1$. Определить токи и сопротивления во всех ветвях.

2.68. На рис. 2.17 представлена схема электрической цепи с источником, имеющим $U=50$ В, нагруженным на потребитель, состоящий из резисторов $R1=80$ Ом, $R2=300$ Ом, $R3=700$ Ом, $R4=110$ Ом. Определить токи во всех ветвях.

2.69. Для электрической схемы рис. 2.18 заданы значения сопротивлений резисторов $R1=R2=25$ Ом, $R3=15$ Ом, $R4=75$ Ом и входное напряжение $U=105$ В. Определить проводимости и токи в ветвях, падения напряжений на всех участках цепи и потребляемую ею мощность.

2.70. В электрической схеме рис. 2.19 сопротивления резисторов $R1=30$ Ом, $R2=90$ Ом, $R3=R6=100$ Ом, $R4=R5=160$ Ом, $R7=50$ Ом. Определить эквивалентное сопротивление цепи, напряжение на входе и токи в ветвях, если $I_4=0{,}05$ А.

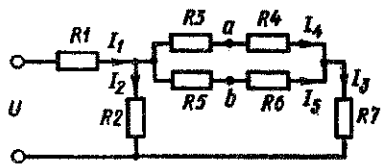

Рис. 2.19

2.71*. ЭДС, приложенная к входу цепи (рис. 2.19), $E=250$ В. Сопротивления резисторов $R1=R5=6{,}5$ кОм, $R2=24$ кОм, $R3=2{,}5$ кОм, $R4=7{,}5$ кОм, $R6=8{,}5$ кОм, $R7=2$ кОм. Определить разность потенциалов между точками a и b. Как изменится эта разность, если закоротить сопротивление $R7$?

2.72. Батарея составлена из трех последовательно соединенных элементов с ЭДС каждого $E=1{,}5$ В и внутренним сопротивлением $r=0{,}5$ Ом. Определить сопротивление нагрузки, падение напряжения на зажимах батареи и мощность нагрузки, если мощность, отдаваемая источником, $P=2{,}25$ Вт.

2.73. Три источника постоянного тока, имеющие ЭДС $E=4{,}5$ В каждый с внутренним сопротивлением по $r=0{,}6$ Ом, включены параллельно и нагружены на резистор сопротивлением $R=2{,}4$ Ом. Определить ток нагрузки и падение напряжения на зажимах батареи. Определить ток нагрузки и падение напряжения на источнике, если включен только один источник ЭДС.

2.74. На батарее, составленной из двух одинаковых параллельно включенных сухих элементов, у каждого из которых $E=1{,}5$ В, падение напряжения $U=1{,}36$ В. Батарея нагружена на резистор сопротивлением $R=1{,}7$ Ом. Определить внутреннее сопротивление каждого элемента.

2.75. К батарее, составленной из трех параллельно соединенных аккумуляторов с ЭДС $E=2{,}4$ В и внутренним сопротивлением каждого $r=0{,}75$ Ом, подключена нагрузка с сопротивлением, изменяющимся от 0,35 до 2,75 Ом. Определить пределы изменения тока нагрузки и мощность, отдаваемую источником, при максимальном и минимальном значениях тока.

2.76*. К батарее, составленной из элементов, у каждого из которых ЭДС $E=1{,}5$ В и внутреннее сопротивление $r=0{,}9$ Ом, подключена нагрузка сопротивлением $r=3{,}0$ Ом, на которой выделяется мощность $P=3$ Вт. Определить, какое минимальное количество элементов необходимо для обеспечения указанной мощности на нагрузке.

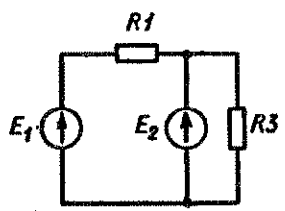

Рис. 2.20

2.77. В электрической цепи, представленной на рис. 2.20, определить токи во всех ветвях и падения напряжения на зажимах источников, если $E_1=36$ В, $E_2=27$ В, $r_1=3{,}5$ Ом, $r_2=1$ Ом, $R1=8{,}5$ Ом, $R3=6$ Ом.

2.78*. Для электрической схемы рис. 2.20 заданы значения $E_1=10$ В, $r_1=1$ Ом, $r_2=2$ Ом, $R1=R3=15$ Ом и ток $I_1=0{,}34$ А. Определить ЭДС E_2, токи I_2 и I_3 и режим работы обоих источников.

2.79. Определить ЭДС источников E_1 и E_2 и ток I_1 в цепи (рис. 2.20), если падение напряжения $U_3=0{,}6$ В, $R3=1{,}2$ Ом, $R1=0{,}9$ Ом, ток $I_2=0{,}7$ А, внутренние сопротивления источников $r_1=0{,}1$ Ом, $r_2=0{,}3$ Ом. Составить баланс мощностей.

2.80. Для электрической цепи, представленной на рис. 2.20, заданы значения параметров цепи в соответствии с табл. 2.2. Для каждого варианта определить параметры, указанные звездочкой, и составить баланс мощностей.

Таблица 2.2

Варианты	E_1, В	E_2, В	r_1, Ом	r_2, Ом	$R1$, Ом	$R3$, Ом	I_1, А	I_2, А	I_3 А	P_1, Вт	P_3 Вт
1	50	104	*	*	120	250	*	0,8	0,4		
2	12	8	4	0	*	*	0,04	0,12	*		
3	*	300	0	0	*	*	*	2,75	5	101	
4	4,5	*	0,5	0,5	*	1,5	0,2	*	0,8		
5	*	750	0	0	*	*	*	0,01	0,06	12,5	
6	18	10	1,0	*	*	*	2,0	1,0		*	10,5

2.81. На рис. 2.21 представлена электрическая цепь, где $E_1=130$ В, $E_2=85$ В и сопротивления резисторов $R1=R3=20$ Ом, $R2=40$ Ом, $r_1=r_2=0$. Определить токи в ветвях и составить баланс мощностей.

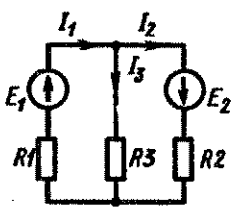

Рис. 2.21

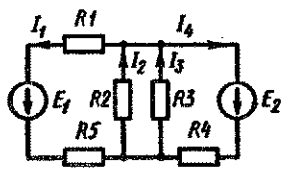

Рис.2.22

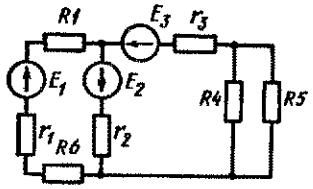

Рис. 2.23

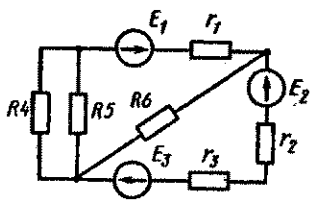

Рис. 2.24

2.82. Для схемы рис. 2.22 заданы значения сопротивлений $R1=2$ кОм, $R2=R4=5$ кОм, $R3=20$ кОм, $R5=4$ кОм. Определить токи в ветвях и составить баланс мощностей, если $E_1=300$ В, $E_2=500$ В и $r_1=r_2=0$.

2.83*. В электрической схеме рис. 2.23 определить токи во всех ветвях и составить баланс мощностей, если $E_1=10$ В, $r_1=2$ Ом, $E_2=2$ В, $r_2=3$ Ом, $E_3=6$ В, $r_3=1{,}5$ Ом, $R1=5{,}5$ Ом, $R4=R5=5$ Ом, $R6=4{,}5$ Ом. Указать режимы работы источников.

2.84. Определить токи во всех ветвях сложной электрической цепи (рис. 2.24) при заданных значениях $E_1=1{,}5$ В, $r_1=0{,}5$ Ом, $E_2=4{,}5$ В, $r_2=0{,}4$ Ом, $E_3=3{,}5$ В, $r_3=0{,}1$ Ом, $R4=10$ Ом, $R5=15$ Ом, $R6=2$ Ом. Определить мощность, отдаваемую источниками.

2.85. К входным зажимам двухпроводной линии приложено напряжение $U=300$ В. Сопротивление потребителя $R=50$ Ом, и он находится на расстоянии $l=280$ м от входных зажимов. Определить потерю напряжения в проводах и мощность нагрузки, если провода выполнены из меди сечением $S=6$ мм^2.

2.86. Напряжение на нагрузке, подключенной к двухпроводной линии из алюминиевых проводов, $U=100$ В. Потеря напряжения в линии $\Delta U=27$ В при токе нагрузки $I=10$ А. Определить сечение проводов, если потребитель находится от источника ЭДС на расстоянии $l=770$ м.

2.87. От источника с ЭДС $E=250$ В и внутренним сопротивлением $r=3{,}6$ Ом питается нагрузка через двухпроводную линию из медных проводов сечением $S=10$ мм^2. Определить сопротивление нагрузки, потребляемую ею мощность, сопротивление проводов и КПД линии, если потребитель удален от источника на $l=1800$ м и потеря напряжения в линии $\Delta U=30$ В.

2.88. Определить ток нагрузки и потерю напряжения в линии при отключении и закорачивании

нагрузки, находящейся на конце двухпроводной линии из медных проводов сечением $S=12{,}5$ мм^2 и длиной $l=320$ м, если на входе линии подключен источник с ЭДС $E=120$ В и внутренним сопротивлением $r=1{,}5$ Ом.

2.89*. На двухпроводной линии из алюминиевого провода сечением $S=4$ мм^2 и длиной $l=500$ м произошло короткое замыкание. Для определения места аварии к входным зажимам подсоединен мощный источник с напряжением $U=24$ В. Измеренное значение тока при этом $I=5$ А. Определить место аварии.

КАЧЕСТВЕННЫЕ ЗАДАЧИ

2.90. Как изменится ток, если заряд, проходящий через поперечное сечение проводника: а) уменьшится вдвое; б) увеличится втрое?

2.91. Как изменится ток в цепи, если при постоянном Q время его прохождения через поперечное сечение проводника: а) увеличить втрое; б) уменьшить в пять раз?

2.92. Как изменится плотность тока в проводнике, если площадь его поперечного сечения увеличить в k раз?

2.93. Во сколько раз изменится сопротивление медного провода, если его длину увеличить в два раза, а сечение уменьшить в три раза?

2.94. При повышении температуры сопротивление терморезистора увеличилось на 50%. Как изменится его проводимость?

2.95. Во сколько раз увеличится мощность рассеяния на резисторе, если ток в нем увеличится в 1,5 раза?

2.96. Во сколько раз надо изменить время прохождения тока через проводник, чтобы выделившееся количество теплоты осталось тем же при уменьшении тока в три раза?

2.97. Три резистора сопротивлением R каждый соединены последовательно. Параллельно одному из резисторов включили резистор сопротивлением $R/2$. Как изменится эквивалентное сопротивление всей цепи?

2.98. Записать в общем виде уравнения по первому и второму законам Кирхгофа для схемы рис. 2.22.

2.99. Сколько уравнений по первому закону Кирхгофа можно записать для схемы рис. 2.23?

2.100. Сколько уравнений по второму закону Кирхгофа можно записать для схемы рис. 2.22?

2.101. Потеря напряжения в линии ΔU. Провод медный. Как изменится это значение, если медный провод заменить: а) стальным; б) алюминиевым при неизменных l и S?

Глава 3

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ И УРАВНЕНИЯ

Магнитная индукция. Магнитный поток. Интенсивность магнитного поля характеризуется магнитной индукцией B. Единица магнитной индукции — тесла (Тл).

Магнитная индукция — векторная величина. Направление этого вектора совпадает с направлением поля в данной точке.

Произведение магнитной индукции B на площадь S, перпендикулярную вектору магнитной индукции, называют магнитным потоком Ф, который выражают в веберах (Вб):

$$\Phi = BS. \qquad (3.1)$$

Если между направлением потока и площадью угол отличается от 90°, то

$$\Phi = BS\cos\alpha, \qquad (3.2)$$

где α — угол между вектором B и перпендикуляром к поверхности.

Электромагнитная сила. На проводник с током длиной l, находящийся в магнитном поле, перпендикулярно направлению поля действует сила F, выражаемая в ньютонах (Н):

$$F = IBl. \qquad (3.3)$$

Если проводник с током расположен под углом α к вектору магнитной индукции B, то

$$F = IBl\sin\alpha. \qquad (3.4)$$

Направление электромагнитной силы определяют по правилу левой руки.

Механическую работу по перемещению проводника с током в магнитном поле на расстояние a вычисляют по формуле

$$A = Fa = IBla = IBS = I\Phi, \qquad (3.5)$$

где S — площадь, описанная проводником при его перемещении, м^2.

Работу выражают в джоулях (Дж).

Взаимодействие проводников с током. Электромагнит. Сила взаимодействия проводников, по которым проходят токи I_1 и I_2,

$$F = \mu_a \frac{I_1 I_2}{2\pi a} l, \qquad (3.6)$$

где μ_a — абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м; l — длина проводников, м; a — расстояние между ними, м; F — сила взаимодействия, Н.

Магнитная индукция во всех точках, расположенных на расстоянии a от оси провода,

$$B = \mu_a \frac{I}{2\pi a}. \qquad (3.7)$$

Абсолютная магнитная проницаемость воздуха и всех веществ, за исключением ферромагнитных материалов, близка к абсолютной магнитной проницаемости вакуума, называемой магнитной постоянной: $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м $= 1{,}256 \cdot 10^{-6}$ Гн/м.

Абсолютная магнитная проницаемость вещества

$$\mu_a = \mu_0 \mu,$$

где μ — магнитная проницаемость, показывающая, во сколько раз абсолютная магнитная проницаемость данного материала больше магнитной постоянной.

Подъемная сила электромагнита (Н)

$$F = 4 \cdot 10^5 B^2 S, \qquad (3.8)$$

где B — магнитная индукция, Тл; S — сечение полюса, м^2.

Напряженность магнитного поля. Магнитное напряжение. Напряженность магнитного поля (А/м)

$$H = B/\mu_a = B/(\mu\mu_0). \qquad (3.9)$$

Напряженность магнитного поля — вектор, направление которого совпадает с направлением поля в данной точке.

Произведение напряженности магнитного поля H на длину участка магнитной линии Δl называют **магнитным напряжением** и выражают в амперах (А).

Магнитное напряжение, взятое по всей длине линии магнитной индукции, называют **магнитодвижущей силой** (МДС) или намагничивающей силой (НС) F_m.

Закон полного тока. Полный ток — это алгебраическая сумма токов, пронизывающих поверхность, ограниченную замкнутым контуром.

По закону полного тока намагничивающая сила (НС) F_m *вдоль замкнутого контура равна полному току:* $F_m = Hl$.

1. Напряженность (А/м) магнитного поля в точке, удаленной на расстояние R от прямолинейного проводника,

$$H = I/(2\pi R). \qquad (3.10)$$

Магнитная индукция

$$B = \mu\mu_0 \frac{I}{2\pi R}. \qquad (3.11)$$

2. Напряженность магнитного поля внутри проводника в точке, удаленной от ее оси на расстояние a,

$$H = \frac{I}{2\pi R^2} a. \qquad (3.12)$$

Если $a = R$, то напряженность на поверхности такого проводника

$$H = I/(2\pi R), \qquad (3.13)$$

где R — радиус цилиндрического проводника, м.

3. Напряженность магнитного поля в центре кольцевого проводника

$$H = I/(2R) = I/d, \qquad (3.14)$$

где R — радиус кольца, м.

4. Напряженность магнитного поля внутри кольцевой катушки

$$H = Iw/(2\pi R_x), \qquad (3.15)$$

где R_x — радиус от центра кольцевой катушки до искомой точки, м.

Магнитная индукция

$$B = \mu\mu_0 H = \mu\mu_0 \frac{Iw}{2\pi R_x}. \qquad (3.16)$$

5. Напряженность магнитного поля на средней магнитной линии кольцевой (тороидальной) катушки

$$H = Iw/l, \qquad (3.17)$$

где I — ток в обмотке катушки, А; w — число витков катушки; l — длина средней магнитной линии катушки, м.

Магнитная индукция

$$B = \mu_a H = \mu_a \frac{Iw}{l}. \qquad (3.18)$$

Магнитный поток

$$\Phi = BS = \mu_a \frac{IwS}{l}, \qquad (3.19)$$

где S — площадь поперечного сечения катушки, м^2.

6. Напряженность магнитного поля на оси цилиндрической катушки в любой ее точке (рис. 3.1)

$$H = \frac{Iw}{2l}(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2). \qquad (3.20)$$

Если $d \ll l$, то $H = Iw/l$.

Магнитная индукция

$$B = \mu\mu_0 H = \mu\mu_0 \frac{Iw}{2l}(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2), \qquad (3.21)$$

или, по приближенной формуле, при условии $d \ll l$

$$B = \mu\mu_0 \frac{Iw}{l}. \qquad (3.22)$$

Электромагнитная индукция. В проводе, перемещающемся в магнитном поле и при этом пересекающем магнитные линии, возбуждается электродвижущая сила электромагнитной индукции. Это явление называют **электромагнитной индукцией**:

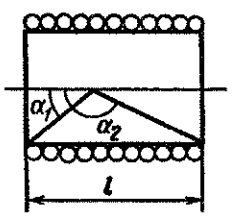

Рис. 3.1

$$E = Blv, \tag{3.23}$$

где E — ЭДС электромагнитной индукции, В; B — магнитная индукция, Тл; l — активная длина проводника, м; v — скорость перемещения проводника, м/с.

При движении проводника в плоскости, расположенной под углом α к вектору магнитной индукции,

$$E = Blv \sin \alpha. \tag{3.24}$$

Направление наведенной ЭДС определяется правилом правой руки.

Мгновенное значение электродвижущей силы, наведенной в контуре,

$$e = -d\Phi/dt, \tag{3.25}$$

где $d\Phi/dt$ — скорость изменения магнитного потока.

ЭДС, наведенная в катушке с числом витков w,

$$e = -w\frac{d\Phi}{dt}, \tag{3.26}$$

или

$$e = -\frac{d\Psi}{dt}, \tag{3.27}$$

где Ψ — потокосцепление, Вб; $\Psi = \Phi w$.

Индуктивность. Коэффициент пропорциональности между потокосцеплением самоиндукции Ψ_L и током I катушки или контура при неизменной магнитной проницаемости среды называют индуктивностью L и выражают в генри (Гн):

$$L = \Psi_L / I. \tag{3.28}$$

Явление возникновения ЭДС в контуре, вызванное изменением тока i в этом же контуре, называют самоиндукцией, а наведенная при этом ЭДС — ЭДС самоиндукции

$$e_L = -\frac{d\Psi_L}{dt}, \tag{3.29}$$

или

$$e_L = -L\frac{di}{dt}. \tag{3.30}$$

Энергия магнитного поля. Для кольцевой катушки энергия магнитного поля, выражаемая в джоулях (Дж),

$$W = \Psi I/2 = LI^2/2. \tag{3.31}$$

Взаимная индукция. Два контура (катушки) индуктивно связаны, если часть магнитного потока Φ_{12}, созданного током первого контура, пронизывает второй контур, а часть потока, вызванного током второго контура Φ_{21}, пронизывает первый контур.

Поток Φ_{12} с витками второго контура (катушки) образует потокосцепление

$$\Psi_{12} = w_2\Phi_{12}. \tag{3.32}$$

Аналогично, поток Φ_{21} образует с витками первого контура (катушки) потокосцепление

$$\Psi_{21} = w_1\Phi_{21}. \tag{3.33}$$

Отношение потокосцепления одного контура (катушки) $\Psi_{12}(\Psi_{21})$ к току $i_1(i_2)$ другого контура (катушки), возбуждающего это потокосцепление, называют взаимной индуктивностью контуров (катушек):

$$M = M_{12} = M_{21} = \frac{\Psi_{12}}{i_1} = \frac{w_2\Phi_{12}}{i_1} = \frac{\Psi_{21}}{i_2} = \frac{w_1\Phi_{21}}{i_2}, \tag{3.34}$$

где M — взаимная индуктивность, Гн.

Взаимная индуктивность зависит от числа витков катушек, их размеров, конфигурации, взаимного расположения и магнитной проницаемости среды.

При изменении тока i_1 во втором контуре наводится ЭДС взаимной индукции

$$e_{M_2} = -\frac{d\Psi_{12}}{dt} = -M\frac{di_1}{dt}, \tag{3.35}$$

а в первом — ЭДС самоиндукции

$$e_{L_1} = -L_1\frac{di_1}{dt}.$$

При изменении тока i_2 в первом контуре наводится также ЭДС взаимной индукции

$$e_{M_1} = -\frac{d\Psi_{21}}{dt} = -M\frac{di_2}{dt}, \tag{3.36}$$

а во втором контуре — ЭДС самоиндукции

$$e_{L_2} = -L_2\frac{di_2}{dt}.$$

Энергия, запасенная в магнитном поле двух контуров (катушек),

$$W = L_1 I_1^2/2 + L_2 I_2^2/2 \pm M I_1 I_2. \qquad (3.37)$$

ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ С РЕШЕНИЯМИ

3.1. В однородном магнитном поле с индукцией $B = 0{,}04$ Тл на подвесе помещен проводник длиной $l = 70$ см перпендикулярно линиям поля (рис. 3.2). Определить электромагнитную силу при токах $I = 0{,}5$; 1,0; 1,5; 2,0 и 2,5 А. При каком значении тока произойдет разрыв нити, если сила натяжения для ее разрыва $F_н = 0{,}08$ Н, сила тяжести проводника $P = 0{,}018$ Н? Определить минимальный ток для разрыва нити подвеса.

Решение. На проводник с током действует сила $F = IBl$. Определяем F для указанных значений токов:

$$F_1 = 0{,}5 \cdot 0{,}04 \cdot 70 \cdot 10^{-2} = 0{,}014 \text{ Н},$$
$$F_2 = 1 \cdot 0{,}04 \cdot 70 \cdot 10^{-2} = 0{,}028 \text{ Н},$$
$$F_3 = 0{,}042 \text{ Н}, \quad F_4 = 0{,}056 \text{ Н}, \quad F_5 = 0{,}07 \text{ Н}.$$

Разрыв нити произойдет при $F_н = P + F$; следовательно, электромагнитная сила разрыва

$$F = F_н - P = 0{,}08 - 0{,}018 = 0{,}062 \text{ Н}.$$

Тогда

$$I = F/(Bl) = 0{,}062/(0{,}04 \cdot 0{,}7) = 2{,}2 \text{ А},$$

т. е. минимальный ток разрыва нити подвеса составляет 2,2 А.

3.2. На половину длины каркаса с наружным диаметром $D = 240$ мм и внутренним $d = 190$ мм, имеющим прямоугольное сечение площадью $S = 400$ мм^2, равномерно нанесена обмотка медным проводом. Определить число витков, индуктивность, сопротивление обмотки и необходимую длину провода (для намотки в один ряд), если магнитная индукция катушки на ее оси составляет $B = 1{,}6 \cdot 10^{-3}$ Тл при токе катушки $I = 3{,}6$ А. Плотность тока $J = 2$ А/мм^2.

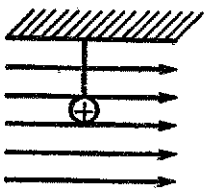

Рис. 3.2

Решение. В связи с тем что намотка произведена на половину

длины каркаса, расчет надо вести по формулам для прямолинейной катушки.

Напряженность поля катушки

$$H = Iw/l_к = 2Iw/l_{ср},$$

где $l_к = {}^1/_2 l_{ср}$; $l_{ср} = \pi D_{ср}$, где

$$D_{ср} = \frac{D+d}{2} = \frac{240+190}{2} = 215 \text{ мм};$$

$$l_{ср} = 3{,}14 \cdot 215 = 675 \text{ мм}.$$

Напряженность поля можно определить из соотношения

$$B = \mu\mu_0 H,$$

откуда

$$H = \frac{B}{\mu\mu_0} = \frac{1{,}6 \cdot 10^{-3}}{1{,}256 \cdot 10^{-6}} = 1274 \text{ А/м}.$$

Тогда

$$w = \frac{Hl_{ср}}{2I} = \frac{1274 \cdot 675 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3{,}6} = 120 \text{ витков}.$$

Определим индуктивность катушки:

$$L = \frac{w\Phi}{I} = \frac{wBS}{I} = \frac{120 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-3} \cdot 400 \cdot 10^{-6}}{3{,}6} = 21{,}4 \cdot 10^{-6} \text{ Гн},$$

или

$$L = \frac{\mu_а w^2 S}{l_{ср}} = \frac{1{,}256 \cdot 10^{-6} \cdot 120^2 \cdot 400 \cdot 10^{-6}}{0{,}5 \cdot 675 \cdot 10^{-3}} = 21{,}4 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}.$$

Найдем необходимую длину провода для намотки этой катушки. Длина одного витка $l_{вит} = 82$ мм. Длина провода

$$l_{пр} = l_{вит} w = 82 \cdot 120 = 9840 \text{ мм} = 9{,}84 \text{ м}.$$

Определим диаметр и сечение медного провода, примененного для намотки катушки:

$$S_{пр} = I/J = 3{,}6/2 = 1{,}8 \text{ мм}^2,$$

$$d_{пр} = \sqrt{S_{пр}/\pi} = \sqrt{1{,}8/3{,}14} = 0{,}57 \text{ мм}.$$

Тогда его сопротивление

$$R = \rho \frac{l}{S} = 0{,}0176 \cdot \frac{9{,}84}{1{,}8} = 0{,}096 \text{ Ом}.$$

3.3. Катушка, имеющая $w=500$ витков, внесена в однородное магнитное поле, индукция которого возросла при этом от 0 до 0,8 Тл за время $t=0{,}1$ с. К катушке подключен резистор сопротивлением $R=20$ Ом. Определить ток и мощность, выделившуюся в резисторе, если сечение катушки $S=12$ см^2 и ее сопротивление $R_к=4$, Ом.

Решение. Определим ЭДС, наведенную в катушке:

$$e=-wS\frac{dB}{dt}=-500\cdot 12\cdot 10^{-4}\frac{0{,}8}{0{,}1}=-4{,}8\text{ В}.$$

Зная сопротивление всей цепи $R=24$ Ом, определим ток в катушке: $I=U/R=4{,}8/24=0{,}2$ А.

Мощность, выделившаяся на резисторе, $P=I^2R=(0{,}2)^2\cdot 20=0{,}8$ Вт.

3.4. Через центр кольца с площадью поперечного сечения $S=1$ см^2, средним диаметром $d=3$ см и числом витков $w=100$ пропущен провод. Определить ЭДС, наведенную в нем, если магнитная проницаемость сердечника $\mu=3000$, а ток I в обмотке кольца за $t=0{,}03$ с изменился на 12 А.

Решение. ЭДС, наведенная в проводнике,

$$e=-M\frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Для ее определения необходимо найти значение взаимной индуктивности:

$$M=\frac{\Psi}{I}=\frac{\mu\mu_0 w_1 w_2 S}{l_{ср}}=$$

$$=\frac{3000\cdot 1{,}256\cdot 10^{-6}\cdot 100\cdot 1\cdot 1\cdot 10^{-4}}{3{,}14\cdot 3\cdot 10^{-2}}=0{,}4\cdot 10^{-3}\text{ Гн}.$$

Тогда $e=-0{,}4\cdot 10^{-3}\cdot\frac{12}{0{,}03}=0{,}16$ В$=160$ мВ.

3.5. На стальное кольцо с магнитной проницаемостью $\mu=4000$ равномерно намотаны две обмотки с числом витков $w=800$ и 300. Сечение кольца круглое, площадью $S=0{,}8$ см^2, его наружный диаметр $D=50$ мм. Определить энергию магнитного поля внутри кольца, если токи $I=2$ А и $I=4{,}5$ А проходят: а) в одном направлении; б) в противоположном.

Решение. Энергия магнитного поля двух связанных катушек

$$W=\frac{L_1I_1^2}{2}+\frac{L_2I_2^2}{2}=\pm MI_1I_2.$$

Прежде чем определить эту энергию, найдем L_1, L_2 и M. Найдем индуктивность первой катушки:

$$L_1=\mu\mu_0\frac{w_1^2}{l_{ср}}S,$$

где $l_{ср}=\pi D_{ср}$; $(D_{ср}=D-d)$.

Найдем диаметр поперечного сечения кольца d из выражения $S=\pi d^2/4$:

$$d=\sqrt{4S/\pi}=\sqrt{4\cdot 80/3{,}14}=10{,}4\text{ мм}$$

и $D_{ср}=50-10{,}4=39{,}6$ мм.

Индуктивность

$$L_1=4000\cdot 1{,}256\cdot 10^{-6}\frac{800^2\cdot 0{,}8\cdot 10^{-4}}{3{,}14\cdot 39{,}6\cdot 10^{-3}}=2{,}06\text{ Гн}.$$

Рассчитаем индуктивность второй катушки:

$$L_2=4000\cdot 1{,}256\cdot 10^{-6}\frac{300^2\cdot 0{,}8\cdot 10^{-4}}{3{,}14\cdot 39{,}6\cdot 10^{-3}}=0{,}29\text{ Гн}.$$

Определим взаимную индуктивность двух катушек:

$$M=\mu\mu_0\frac{w_1w_2}{l_{ср}}S=$$

$$=4000\cdot 1{,}256\cdot 10^{-6}\cdot 300\frac{800\cdot 0{,}8\cdot 10^{-4}}{3{,}14\cdot 39{,}6\cdot 10^{-3}}=0{,}775\text{ Гн}.$$

Зная L_1, L_2 и M, найдем значение энергии двух катушек:

а) при токах, проходящих в одном направлении,

$$W_1=\frac{2{,}06\cdot 2^2}{2}+\frac{0{,}29\cdot 4{,}5^2}{2}+0{,}775\cdot 2\cdot 4{,}5=14{,}07\text{ Дж};$$

б) при токах, проходящих в противоположных направлениях,

$$W_2=\frac{2{,}06\cdot 2^2}{2}+\frac{0{,}29\cdot 4{,}5^2}{2}-0{,}775\cdot 2\cdot 4{,}5=0{,}11\text{ Дж}.$$

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

3.6. В однородное магнитное поле с индукцией $B=1{,}4$ Тл внесена прямоугольная рамка площадью $S=150$ см^2 перпендикулярно линиям магнитного поля. Определить магнитный поток, пронизывающий эту рамку, и магнитный поток при ее повороте на углы 25 и 55° от вертикали.

3.7. В однородное магнитное поле под углом 60° к линиям магнитного поля помещена прямоугольная рамка с размерами сторон 30 и 50 см. Определить поток, пронизывающий эту рамку, если $B=0{,}9$ Тл.

3.8. Определить диаметр рамки, помещенной в однородное магнитное поле с магнитной индукцией $B=0{,}6$ Тл под углом 45° к линиям магнитного поля, при этом $\Phi=0{,}0085$ Вб.

3.9. Магнитный поток $\Phi=0{,}002$ Вб пронизывает рамку в форме равностороннего треугольника со стороной 24 см. Определить магнитную индукцию однородного магнитного поля, если рамка расположена под углом 75° к линиям магнитного поля.

3.10. Прямолинейный проводник длиной $l=0{,}3$ м, по которому проходит ток $I=12$ А, помещен в однородное магнитное поле с магнитной индукцией $B=0{,}5$ Тл. Определить силу, действующую на проводник, если он расположен: а) перпендикулярно линиям поля; б) вдоль линий поля.

3.11. В однородном магнитном поле находится прямолинейный проводник с током $I=25$ А и длиной $l=80$ см под углом 30° к вектору магнитной индукции. Определить магнитную индукцию поля, если сила, действующая на проводник, $F=3{,}2$ Н.

3.12. Определить угол между проводником длиной $l=1{,}2$ м, по которому проходит ток $I=30$ А, и вектором магнитной индукции $B=1{,}2$ Тл однородного магнитного поля, если сила, действующая на этот проводник, $F=8{,}5$ Н.

3.13. Однородное магнитное поле с магнитной индукцией $B=1{,}0$ Тл действует на прямолинейный проводник с током с силой $F=0{,}5$ Н. Длина проводника $l=20$ см. Определить ток, проходящий по проводнику, расположенному перпендикулярно линиям магнитного поля.

3.14*. Напряженность однородного магнитного поля $H=6{,}5\cdot10^4$ А/м. В это поле перпендикулярно магнитному потоку внесен проводник с током $I=3{,}5$ А. Проводник подвешен на двух нитях (массой которых можно пренебречь). Определить угол отклонения нитей от вертикали, если сила тяжести $P=0{,}2$ Н при длине проводника $l=30$ см. Окружающая среда — воздух.

3.15*. В однородном магнитном поле на двух токоподводящих нитях горизонтально подвешен проводник с током длиной $l=0{,}5$ м, на который действует сила тяжести $P=0{,}65$ Н. Вектор магнитной индукции $B=0{,}25$ Тл направлен вертикально. Определить, какой ток необходимо пропустить через проводник, чтобы нити отклонились от вертикали на угол 60°. Определить совершенную при этом работу, если длина каждой нити $l=0{,}4$ м.

3.16. В однородное магнитное поле, имеющее горизонтальное направление вектора напряженности $H=9{,}4\cdot10^4$ А/м, внесен прямолинейный проводник длиной $l=10$ см с действующей на него силой тяжести $P=0{,}08$ Н. Проводник подвешен на двух нитях и расположен перпендикулярно линиям поля. Определить наименьшее значение тока в проводнике для разрыва нитей, если каждая нить разрывается при $F_н=0{,}06$ Н.

3.17. По условию задачи 3.16 определить минимальное значение тока в проводнике, необходимое для разрыва одной из нитей подвеса (рис. 3.3), причем длина нитей подвеса равна длине проводника.

3.18. По прямолинейному проводнику проходит ток $I=50$ А. Определить напряженность и индукцию поля в точке, отстоящей на расстоянии $R=25$ мм от проводника. Окружающая среда — воздух. Определить те же значения при токах 10, 30, 60, 80 и 100 А.

8.19. Магнитная индукция в точке, отстоящей от прямолинейного проводника, находящегося в воздушной среде, на расстоянии $R=10$ мм, составляет $B=0{,}002$ Тл. Определить ток в проводнике.

3.20. Определить, на каком расстоянии от прямолинейного проводника, находящегося в воздушной среде, при токе $I=100$ А напряженность $H=400$ А/м. Определить индукцию поля в этой точке.

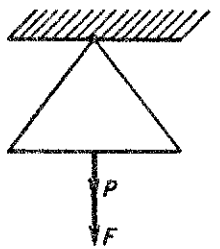

Рис. 3.3

3.21. По прямолинейному медному проводнику с поперечным

сечением $S=16$ мм^2 проходит ток $I=100$ А. Определить напряженность поля и магнитную индукцию в точках, находящихся на расстояниях $a=0$; 1; 2,5; 4; 5; 8; 10 мм от оси проводника. Определить H и B на поверхности проводника. Построить зависимости $H=F(a)$ и $B=F(a)$.

3.22. Внутри медного прямолинейного проводника, по которому проходит ток $I=150$ А, на расстоянии $a=1,5$ мм от оси проводника индукция магнитного поля $B=0,004$ Тл. Определить площадь сечения проводника и плотность тока.

3.23. Ток $I=80$ А, проходящий по прямолинейному алюминиевому проводнику сечением $S=25$ мм^2, создает напряженность магнитного поля внутри проводника $H_1=4000$ А/м и вне проводника $H_2=510$ А/м. Определить расстояние этих точек от оси проводника.

3.24. По кольцевому проводнику проходит ток $I=12$ А. Определить напряженность магнитного поля в его центре, если диаметр кольца $d=25$ мм.

3.25. В центре кольцевого проводника с током напряженность магнитного поля $H=1500$ А/м. Радиус кольца $R=15$ мм. Определить ток, проходящий по проводнику.

3.26. Ток, проходящий по кольцевому проводнику, $I=25$ А создает напряженность магнитного поля в центре $H=400$ А/м. Определить диаметр кольца.

3.27. По кольцевой катушке, намотанной на каркас из гетинакса, проходит ток 1,5 А. Катушка имеет $w=250$ витков. Наружный диаметр ее $D=52$ мм, внутренний $d=42$ мм. Определить максимальную и минимальную напряженности поля внутри катушки и напряженность поля на расстоянии $r=4$ мм от наружного диаметра.

3.28. Кольцевая катушка питается от источника с ЭДС $E=4,5$ В и внутренним сопротивлением $r=0,2$ Ом. Катушка намотана медным изолированным проводом сечением $S=0,5$ мм^2 на текстолитовый каркас квадратного сечения площадью $S=25$ мм^2 и имеет 850 витков. Наружный диаметр каркаса $D=100$ мм. Определить максимальную и минимальную напряженности и индукцию поля внутри катушки

3.29*. Кольцевая катушка, имеющая $w=400$ витков, намотана медным проводом сечением

$S=0,1$ мм^2 на эбонитовый каркас с наружным диаметром $D=170$ мм и внутренним $d=110$ мм. Каркас имеет круглое сечение. Определить ЭДС и внутреннее сопротивление источника, питающего эту катушку, если максимальное значение напряженности поля внутри катушки $H=4350$ А/м, а полное сопротивление всей цепи $R=7,2$ Ом.

3.30. На кольцевой стальной сердечник ($\mu=650$) с квадратным сечением площадью $S=1$ см^2 и наружным диаметром $D=6$ см равномерно намотано 540 витков. Определить напряженность на средней магнитной линии, магнитную индукцию и поток, если по катушке проходит ток $I=0,5$ А.

3.31. В центре цилиндрической катушки длиной $l=500$ мм и диаметром $d=60$ мм при прохождении по ней тока $I=2,5$ А создается напряженность магнитного поля $H=680$ А/м. Определить сопротивление и длину медного провода при намотке в один ряд, если $J=0,5$ А/мм^2.

3.32. Определить число витков и длину провода для намотки цилиндрической катушки, если длина катушки $l=20$ см, а ее диаметр $d=1,6$ см. При токе в обмотке $I=3$ А магнитный поток $\Phi=3\cdot10^{-7}$ Вб. Определить напряженность в центре катушки.

3.33. В центре цилиндрической катушки длиной $l_к=350$ мм и диаметром $d_к=12$ мм создается напряженность магнитного поля $H=6000$ А/м. Определить ток в катушке, ее сопротивление и магнитный поток, если известно, что катушка намотана в один ряд медным изолированным проводом диаметром $d_м=0,25$ мм и сечением $S_м=0,0416$ мм^2.

3.34. Определить магнитный поток Φ и магнитную проницаемость μ стального сердечника цилиндрической катушки длиной $l=80$ см и диаметром $d=4$ см, имеющей 200 витков, если при токе $I=1$ А в центре цилиндрической катушки создается магнитная индукция $B=0,68$ Тл.

3.35*. Для цилиндрической катушки задано значение НС $F_m=2000$ А. Катушка намотана в один ряд медным изолированным проводом диаметром $d=0,2$ мм и имеет $w=1250$ витков. Определить напряженность поля в центре катушки, магнитную индукцию, ток катушки и необходимую ее длину для двух случаев: а) катушка без сердечника; б) катушка со стальным сердечником ($\mu=180$).

3.36*. Цилиндрическая катушка длиной $l=15$ см и площадью поперечного сечения $S=6{,}5$ см^2 имеет $w=600$ витков. Определить индуктивность этой катушки без сердечника и с сердечником ($\mu=800$). Как изменится индуктивность катушки с сердечником, если длину сердечника увеличить в три раза, число витков уменьшить вдвое, а сердечник взять с магнитной проницаемостью, в четыре раза большей?

3.37. Сопротивление обмотки цилиндрической катушки с сердечником $R=1{,}2$ Ом. Провод медный диаметром $d=0{,}5$ мм, длина сердечника $l=200$ мм. Определить индуктивность катушки, если магнитная проницаемость $\mu=300$.

3.38. Магнитная проницаемость сердечника цилиндрической катушки $\mu=1600$. Площадь сечения сердечника катушки $S=2{,}8$ см^2 при длине $l=5{,}6$ см. Определить необходимое число витков катушки и ток для получения магнитного потока $\Phi=0{,}02$ Вб и индуктивности $L=0{,}4$ Гн.

3.39. Определить силу взаимодействия двух проводников с током, расположенных на расстоянии $a=5$ мм друг от друга в воздухе, по которым проходят токи $I_1=30$ А, $I_2=75$ А. Проводники имеют длину $l=200$ мм каждый.

3.40. Два проводника, по которым проходят токи $I_1=60$ А и $I_2=48$ А, расположены параллельно друг другу. Определить минимальное расстояние между ними при условии, что сила их взаимодействия не должна превышать 0,1 Н. Длина каждого из проводников $l=75$ см.

3.41. Два проводника с токами $I_1=35$ А и $I_2=76$ А одного направления длиной $l=1500$ мм каждый расположены на расстоянии $a=60$ мм друг от друга в воздухе. Определить, как изменится расстояние между ними, если в первом проводнике произошло короткое замыкание и ток возрос до 150 А, при этом сила взаимодействия увеличилась в восемь раз.

3.42. Два параллельных провода укреплены на изоляторах, расстояние между которыми 1,5 м. По ним проходят токи $I_1=I_2=150$ А в одном направлении. Определить значение и направление силы, действующей на каждый изолятор, если расстояние между проводами $a=50$ мм.

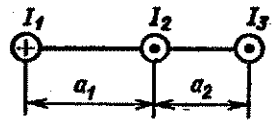

Рис. 3.4

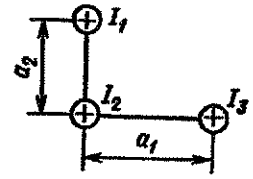

Рис.3.5

3.43*. Три проводника длиной $l=500$ мм каждый расположены в одной плоскости. По ним проходят токи $I_1=18$ А, $I_2=24$ А и $I_3=35$ А, причем токи I_2 и I_3 направлены в одном направлении, а ток I_1 — в противоположном, как указано на рис. 3.4. Расстояния между проводниками $a_1=25$ мм, $a_2=20$ мм. Определить значения и направления сил F_1 и F_2 взаимодействия третьего проводника соответственно с первым и вторым проводниками, а также результирующую силу.

3.44. Три проводника длиной $l=120$ см каждый расположены друг относительно друга на расстояниях $a_1=35$ см, $a_2=20$ см (рис. 3.5). Токи в проводах проходят в одном направлении и равны $I_1=30$ А, $I_2=75$ А и $I_3=50$ А. Определить значение и направление результирующей силы, действующей на третий проводник со стороны первого и второго проводников.

3.45. В прямолинейном проводнике с активной длиной $l=0{,}8$ м при его перемещении в однородном магнитном поле с магнитной индукцией $B=0{,}7$ Тл перпендикулярно линиям этого поля наводится ЭДС $E=8{,}4$ В. Определить скорость перемещения проводника и путь пройденный за время $\Delta t=0{,}06$ с.

3.46. В однородном магнитном поле с индукцией $B=1{,}2$ Тл под углом 45° к линиям поля со скоростью $v=25$ м/с перемещается прямолинейный проводник с активной длиной $l=0{,}3$ м. Определить наведенную в нем ЭДС.

3.47. На концах прямолинейного проводника, перемещающегося в однородном магнитном поле с индукцией $B=0{,}9$ Тл перпендикулярно линиям поля со скоростью $v=20$ м/с, наводится ЭДС $E=7{,}2$ В. Определить активную длину проводника.

3.48. Определить активную длину проводника по условию задачи 3.47, если проводник перемещается под углом 55° к линиям поля. Какой путь пройдет проводник за время $\Delta t=0{,}02$ с?

3.49. Прямолинейный проводник с активной длиной $l=0{,}45$ м перемещается в однородном магнитном поле со скоростью $v=36$ м/с под углом 70° к линиям поля. ЭДС, наведенная в нем, $E=14{,}6$ В. Определить напряженность магнитного поля.

3.50. Прямолинейный проводник с активной длиной $l=0{,}2$ м перемещается в однородном магнитном поле перпендикулярно линиям магнитного поля. Напряженность поля $H=1500$ А/м, скорость перемещения проводника $v=50$ м/с. Как надо изменить скорость перемещения проводника для получения того же значения наведенной ЭДС, если проводник перемещать под углом 30° к линиям поля; то же, если $\alpha=45,\ 60,\ 80,\ 0,\ 15°$?

3.51. Магнитная индукция B однородного магнитного поля за время $\Delta t=0{,}02$ с линейно изменилась на 0,6 Тл. Определить ЭДС, наведенную в витке площадью $S=4{,}8$ см^2, расположенном перпендикулярно линиям этого магнитного поля.

3.52. В равномерное магнитное поле перпендикулярно линиям поля помещен виток прямоугольного сечения. Определить площадь витка, если при линейном изменении магнитной индукции $\Delta B=0{,}9$ Тл за время $\Delta t=0{,}05$ с наведенная ЭДС составила 70 мВ.

3.53. Виток круглого сечения с диаметром $d=8$ см помещен в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям этого поля. При линейном изменении магнитной индукции на $\Delta B=1{,}2$ Тл наведенная в витке ЭДС $E=24$ мВ. Определить время изменения потока.

3.54. Катушка, имеющая 2500 витков, помещена в однородное магнитное поле, которое за время $\Delta t=0{,}3$ с уменьшилось равномерно до нуля. При этом на концах катушки была наведена ЭДС $E=18$ В. Определить первоначальное значение магнитного потока.

3.55. Катушка, имеющая 140 витков, нагружена на резистор сопротивлением $R=2{,}5$ Ом, на котором выделилась мощность $P=0{,}4$ Вт при изменении магнитной индукции равномерного магнитного поля на $\Delta B=1$ Тл за время $\Delta t=0{,}2$ с. Определить поперечное сечение катушки. Сопротивлением катушки пренебречь.

3.56. Контур, по которому проходит ток $I=10{,}5$ А, имеет потокосцепление самоиндукции $\Psi_L=0{,}008$ Вб. Определить индуктивность контура.

3.57. Индуктивность контура, по которому проходит ток $I=3{,}5$ А, $L=3{,}5$ мГн. Определить потокосцепление самоиндукции контура.

3.58. Контур, по которому проходит ток, имеет потокосцепление самоиндукции $\Psi_L=0{,}01$ Вб. Определить ток в контуре, если его индуктивность $L=1{,}8$ мГн.

3.59. По кольцевой катушке со стальным сердечником ($\mu=120$) проходит ток $I=4$ А. Определить индуктивность катушки, если она имеет 800 витков, сердечник с прямоугольным сечением со сторонами 2,5 и 1,8 см и напряженность поля на средней магнитной линии $H=12\,800$ А/м.

3.60. Магнитная индукция в центре цилиндрической катушки со стальным сердечником ($\mu=500$) $B=1{,}45$ Тл. Длина катушки $l=180$ мм, площадь поперечного сечения сердечника $S=78{,}5$ мм^2. Определить ток в катушке, напряженность в центре и ее индуктивность, если катушка имеет 540 витков.

3.61. В катушке, имеющей 200 витков и находящейся в однородном магнитном поле, ток изменился равномерно с 16 до 3,5 А в результате линейного изменения магнитной индукции от 0,1 до 0,05 Тл. Определить коэффициент самоиндукции катушки, если площадь ее витка $S=350$ мм^2.

3.62. Измерительная катушка в течение $\Delta t=0{,}5$ с была удалена из однородного магнитного поля с магнитным потоком $\Phi=2{,}5\cdot10^{-4}$ Вб. Наведенное значение ЭДС $E=120$ мВ, скорость изменения тока в катушке (линейный закон) $\Delta I=3$ А/с. Определить число витков катушки и ее индуктивность.

3.63. В катушке индуктивностью $L=0{,}08$ мГн ток равномерно изменился в течение времени $t=0{,}015$ с от 11 до 2 А. Определить наведенную ЭДС.

3.64. На зажимах катушки при линейном изменении тока $\Delta I=5$ А появилась ЭДС $E=1{,}6$ В. Время изменения тока в катушке $\Delta t=0{,}02$ с. Определить индуктивность катушки и скорость изменения тока в ней.

3.65. Определить скорость изменения тока в катушке с индуктивностью $L=0{,}4$ Гн, если наведенная ЭДС на ее зажимах за время $\Delta t=0{,}3$ с $E=300$ мВ.

3.66. На зажимах катушки с индуктивностью $L=100$ мГн наведенная ЭДС $E=25$ мВ при равномерном изменении в ней тока от 1 А до 200 мА.

Определить время и скорость изменения тока в катушке.

3.67. В измерительной катушке, имеющей длину $l=20$ мм, площадь поперечного сечения $S=100$ мм^2 и $w=150$ витков, скорость изменения тока составляет 110 А/с. Определить значение ЭДС самоиндукции.

3.68. По катушке с индуктивностью $L=0{,}5$ Гн проходит ток $I=3{,}6$ А. Определить потокосцепление самоиндукции и энергию, запасенную в катушке.

3.69. Энергия магнитного поля катушки $W=12{,}8$ Дж. Определить потокосцепление самоиндукции и индуктивность катушки, если ток в ней $I=6{,}4$ А.

3.70. Энергия, запасенная в катушке, $W=5{,}2$ Дж. Определить ток в катушке, если ее индуктивность $L=0{,}3$ Гн.

3.71. Определить наведенную ЭДС в индуктивной катушке при соединении двух катушек с $L_1=50$ мГн и $L_2=100$ мГн (взаимная индуктивность отсутствует): а) последовательно; б) параллельно, если скорость изменения тока в обоих случаях составляет 80 А/с.

3.72*. На зажимах двух катушек с индуктивностями $L_1=300$ мкГн и $L_2=750$ мкГн, соединенных последовательно и обтекаемых током $I=20$ А, при разрыве цепи ЭДС самоиндукции $E=42$ мВ. Определить время Δt разрыва цепи и ЭДС самоиндукции, если параллельно этим двум катушкам подключить катушку с индуктивностью $L_3=850$ мкГн, а время коммутации оставить тем же. Катушки индуктивно не связаны.

3.73. Три индуктивные катушки с $L_1=60$ мГн, $L_2=100$ мГн и $L_3=50$ мГн соединены параллельно и на зажимах катушек при линейном изменении тока в цепи от 3,4 до 1 А наведенное значение ЭДС $E=1{,}7$ В. Определить время изменения тока в цепи.

3.74. Определить наведенное значение ЭДС, если по условию задачи 3.73 индуктивные катушки L_1 и L_2 соединены между собой параллельно, а L_3 — последовательно с ними. Ток в цепи изменяется линейно от 3,4 до 1 А за время $\Delta t=0{,}1$ с.

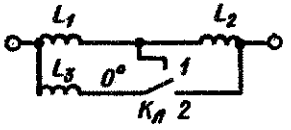

Рис. 3.6

3.75. На рис. 3.6 представлена схема соединения индуктивных катушек (не связанных индуктивно) L_1, L_2, L_3. Определить эквивалентную индуктивность для положений *0*, *1* и *2* ключа *Кл*, если $L_1=320$ мГн, $L_2=130$ мГн, $L_3=450$ мГн.

3.76. Определить взаимную индуктивность двух катушек, включенных последовательно, если при встречном включении их общая индуктивность $L=12$ мГн, а при согласном $L=62$ мГн.

3.77. Две индуктивные катушки L_1 и L_2 соединены последовательно. При согласном включении их эквивалентная индуктивность $L=0{,}08$ Гн, при встречном $L=0{,}016$ Гн. Определить индуктивность катушки L_2, если $L_1=0{,}025$ Гн.

3.78. Две параллельно включенные индуктивные катушки с $L_1=100$ мГн и $L_2=60$ мГн имеют взаимную индуктивность $M=40$ мГн. Определить их эквивалентную индуктивность при согласном и встречном включении.

3.79. Две индуктивные катушки соединены параллельно. При согласном включении их эквивалентная индуктивность $L=125{,}5$ мГн при взаимной индуктивности $M=60$ мГн. Определить индуктивность одной из катушек и их эквивалентную индуктивность при встречном включении, если индуктивность другой катушки равна 150 мГн.

3.80. По двум включенным встречно индуктивным катушкам с $L_1=L_2=0{,}22$ Гн с взаимной индуктивностью $M=0{,}01$ Гн проходит ток $I=4{,}8$ А. Определить ЭДС, наведенную на зажимах этой цепи при ее отключении, если $\Delta t=0{,}5$ с.

3.81. Две параллельно включенные индуктивные катушки с $L_1=L_2=40$ мГн, имеющие $M=0{,}01$ Гн, соединены согласно и подключаются в течение 0,02 с к источнику. Наведенная при этом ЭДС $E=1{,}2$ В. Определить установившееся значение тока в цепи.

3.82. Взаимная индуктивность двух контуров $M=20$ мГн. Определить потокосцепление второго контура с первым при токе в первом контуре $I_1=6{,}3$ А.

3.83. Определить взаимную индуктивность двух контуров, если потокосцепление второго контура с первым $\Psi_{21}=80\cdot10^{-3}$ Вб, а ток в первом контуре $I_1=1{,}6$ А.

3.84. Взаимная индуктивность двух контуров $M=2{,}2$ мГн. Потокосцепление первого контура со вторым $\Psi_{12}=1{,}45\cdot10^{-2}$ Вб. Определить ток во втором контуре.

3.85. Взаимная индуктивность двух контуров $M=50$ мГн. В первом контуре за 0,8 с ток изменился от 5 до 1 А. Определить изменение потокосцепления второго контура с первым $\Delta\Psi_{21}$.

3.86. Изменение потокосцепления второго контура с первым $\Delta\Psi_{21}=0{,}15$ Вб. Определить взаимную индуктивность контуров, если при подключении первого контура к источнику постоянного тока установившееся значение тока в первом контуре $I_1=12$ А.

3.87. Изменение потокосцепления второго контура с первым $\Delta\Psi_{21}=45\cdot10^{-3}$ Вб. Определить изменение тока в первом контуре, если взаимная индуктивность $M=18\cdot10^{-3}$ Гн.

3.88. Для двух индуктивно связанных контуров с $M=4\cdot10^{-3}$ Гн ЭДС, наведенная во втором контуре, при изменении тока в первом контуре составляет 250 мВ. Определить изменение тока в первом контуре, а также время и скорость его изменения, если $\Delta\Psi_{21}=0{,}08$ Вб.

3.89. Определить потокосцепление самоиндукции и энергию, запасенную в магнитном поле контура, по которому проходит ток $I=12$ А, если индуктивность контура $L=150$ мГн.

3.90. Потокосцепление самоиндукции контура $\Psi_L=30\cdot10^{-3}$ Вб, ток $I=28$ А. Определить энергию, запасенную в магнитном поле контура.

3.91. Энергия, запасенная в магнитном поле контура, $W=6{,}3$ Дж. Определить индуктивность и потокосцепление контура, если $I=5{,}5$ А.

3.92. Потокосцепление самоиндукции контура, по которому проходит ток, $\Psi_L=0{,}12$ Вб. Энергия, запасенная в магнитном поле, $W=0{,}66$ Дж. Определить индуктивность контура.

3.93. Энергия, запасенная в магнитном поле контура, $W=1{,}8$ Дж. Потокосцепление самоиндукции $\Psi_L=0{,}54$ Вб. Определить ток в контуре и его индуктивность.

3.94. Энергия магнитного поля контура изменилась на 0,8 Дж при изменении тока в нем от 3 до 6,5 А. Определить время изменения тока и индуктивность контура, если ЭДС самоиндукции $E=340$ мВ.

3.95*. Катушка обладает индуктивностью $L=1{,}2$ Гн. Определить изменение энергии, запасенной в магнитном поле катушки, наведенную ЭДС при

линейном изменении тока в ней от 16 до 10 А за время $t=0{,}4$ с, а также энергию магнитного поля при указанных значениях токов.

3.96. На немагнитный кольцевой каркас сечением $S=1$ см^2 намотано 1200 витков. Определить энергию магнитного поля катушки, если по катушке проходит ток $1=2{,}5$ А, а средняя ее длина $l=18{,}9$ см. Как изменятся энергия магнитного поля катушки и ее индуктивность, если ток уменьшить в 1,5 раза?

3.97. На кольцо, имеющее квадратное сечение площадью $S=16$ см^2 и внутренний диаметр $d=80$ мм, намотано 600 витков. Определить индуктивность и энергию, запасенную в магнитном поле катушки, при токе $I=12$ А. Сердечник стальной, $\mu=4000$.

3.98*. Кольцевая катушка со стальным сердечником ($\mu=1000$) имеет индуктивность $L=0{,}5$ Гн. Энергия, запасенная в магнитном поле катушки, $W=5{,}6$ Дж. Определить число витков и ток в катушке, если внешний диаметр тороида $D=40$ мм, сечение круглое диаметром 5 мм. Как изменится энергия, если число витков уменьшить в два раза, а ток увеличить в три раза?

3.99. Энергия магнитного поля цилиндрической катушки $W=3{,}8$ Дж. Определить индуктивность катушки и магнитную проницаемость сердечника, если $I=6$ А, число витков катушки $w=150$, длина ее $l=40$ мм, площадь сечения $S=1$ см^2.

3.100. Индуктивность цилиндрической катушки $L=1{,}2$ Гн. Сердечник катушки стальной, имеет длину $l=65$ мм и площадь сечения $S=200$ мм^2. Определить магнитный поток катушки, если энергия ее магнитного поля $W=85$ Дж, а $w=500$ витков.

3.101. Цилиндрическая катушка без сердечника диаметром $D=20$ мм и длиной $l=100$ мм, по обмотке которой проходит ток $I=3{,}5$ А, имеет 600 витков. Определить энергию магнитного поля катушки, ее индуктивность и магнитный поток.

3.102. Соленоид имеет 250 витков при длине $l=300$ мм и поперечном сечении $S=18$ см^2. На него надета катушка с десятью витками. Определить ЭДС, наведенную во второй катушке соленоида, если за время $t=0{,}02$ с ток в первой обмотке изменился на 8 А (по линейному закону).

3.103. Первичная обмотка соленоида имеет 1200 витков. Длина его $l=240$ мм, диаметр $D=30$ мм.

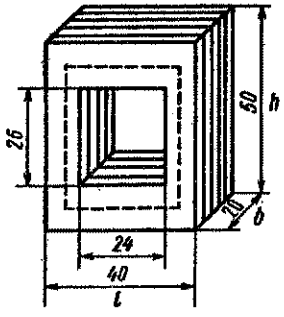

Рис. 3.7

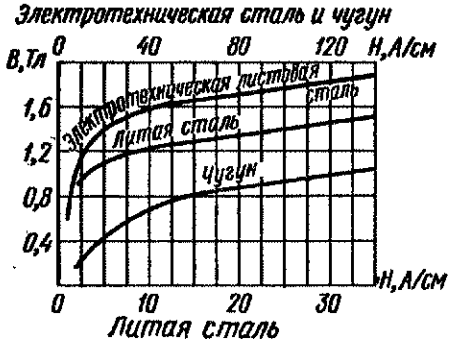

Рис. 3.8

На соленоид надет один виток. Определить ЭДС, наведенную в этом витке, при подключении первичной обмотки соленоида к источнику. Время включения источника $t=0{,}05$ с, установившееся значение тока в обмотке $I=1$ А. Сердечник соленоида стальной, $\mu=500$ (ток изменяется по линейному закону).

3.104. В сердечнике, представленном на рис. 3.7, необходимо создать магнитный поток $\Phi=2{,}2\cdot10^{-4}$ Вб при токе в обмотке $I=1{,}2$ А. Толщина пакета магнитопровода $b=2$ см. Определить необходимое число витков, если сердечник выполнен из листовой электротехнической стали (рис. 3.8).

3.105*. Из условия предыдущей задачи определить необходимое число витков для создания такого же потока, но при наличии в одной из боковых сторон зазора $\delta=0{,}05$ см.

3.106*. На рис. 3.9 представлены геометрические размеры сердечника, имеющего зазоры $\delta=2$ мм каждый. Верхняя часть выполнена из листовой электротехнической стали, нижняя — из литой стали (см. рис. 3.8). Определить, какой ток надо пропустить по обмотке с числом витков $w=1750$, нанесенной на магнитопровод, для создания магнитного потока $\Phi=2{,}5\cdot10^{-4}$ Вб.

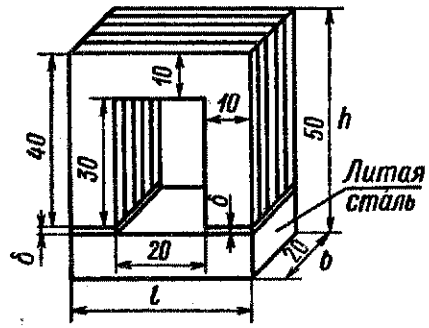

Рис. 3.9

3.107. На кольцо, выполненное из электротехнической стали с внешним диаметром $D=42$ мм, внутренним $d=30$ мм и толщиной $b=8$ мм (сечение прямоугольное), нанесено равномерно 200 витков. Определить магнитный поток в кольце при токе в обмотке $I=0{,}5$ А, а также его индуктивность.

3.108*. Из условия предыдущей задачи определить ток в катушке для создания того же магнитного потока, что и в задаче 3.107, если кольцо имеет воздушный зазор $\delta=0{,}5$ мм.

КАЧЕСТВЕННЫЕ ЗАДАЧИ

3.109. В однородное магнитное поле перпендикулярно вектору магнитной индукции внесена прямоугольная рамка площадью S. Как изменится магнитный поток через рамку, если ее расположить под углом $\pi/6$ к вектору магнитной индукции?

3.110. Как должна быть расположена рамка в магнитном поле, чтобы поток, пронизывающий ее, отсутствовал?

3.111. Как меняется магнитный поток через рамку, расположенную перпендикулярно линиям поля, если магнитная индукция: а) уменьшается в три раза; б) увеличивается в пять раз при неизменной площади рамки?

3.112. На проводник с током I, помещенный в однородное магнитное поле с индукцией B перпендикулярно этому вектору, действует электромагнитная сила F. Как изменится эта сила при неизменном токе и активной длине проводника, если он перемещается под углом 30, 45 и 60° к направлению поля?

3.113. На перемещение проводника с током в плоскости, перпендикулярной направлению поля, затрачена работа A. Как изменится ее значение, если: а) индукцию поля увеличить в четыре раза, а путь перемещения проводника уменьшить в два раза; б) индукцию поля увеличить в три раза, а проводник с током переместить под углом 30° к направлению поля на расстояние, в два раза меньшее первоначального?

3.114. При каких условиях отсутствует сила, действующая на проводник с током в магнитном поле?

3.115. Два проводника с токами I_1 и I_2 длиной l каждый находятся на расстоянии a друг от друга. Токи проходят в противоположных направлениях. Один из них закреплен. Указать направление силы, действующей на второй проводник.

3.116. Два проводника с токами, проходящими в противоположных направлениях, взаимодействуют с силой F. Как изменится эта сила, если ток в одном проводнике уменьшить в два раза и расстояние между ними тоже уменьшить в два раза?

3.117. Два проводника с током взаимодействуют с силой F. Как надо изменить расстояние между ними, чтобы при уменьшении каждого из токов I_1 и I_2 в три раза сила их взаимодействия осталась прежней?

3.118. Сила взаимодействия двух проводников с токами I_1 и I_2 равна F. За счет изменения каких параметров можно увеличить эту силу в два раза?

3.119. Как зависит магнитная индукция вокруг проводника от среды?

3.120. Магнитная индукция в точке, находящейся на расстоянии a от проводника с током, равна B. Как изменится ее значение, при неизменном токе в проводнике, если a уменьшить в k раз? Как изменится магнитная индукция, если одновременно увеличить ток в проводнике в n раз?

3.121. Как изменится магнитное напряжение на участке, если напряженность поля увеличить в k раз?

3.122. Как изменяется напряженность магнитного поля внутри проводника радиусом R от центра до поверхности проводника?

3.123. Как зависит напряженность магнитного поля внутри и вне проводника с током от значения этого тока?

3.124. Как изменяется напряженность магнитного поля в центре кольцевого проводника при: а) увеличении радиуса в k раз; б) уменьшении радиуса в n раз?

3.125. Напряженность магнитного поля внутри кольцевой катушки равна H. Как изменится ее значение, если число витков катушки увеличить в пять раз, а ток уменьшить в два раза?

3.126. Напряженность магнитного поля на средней магнитной линии кольцевой катушки равна H. Как

изменится ее значение, если при неизменном токе и числе витков взять кольцевую катушку: а) с бóльшим диаметром; б) с меньшим диаметром по сравнению с начальным?

3.127. Как зависит напряженность магнитного поля от среды?

3.128. Как влияют длина проводника и его сечение на напряженность, создаваемую этим проводником?

3.129. Напряженность магнитного поля цилиндрической катушки без сердечника в какой-то точке оси равна H. Как изменится значение магнитной индукции в этой точке, если в катушку вставить сердечник с магнитной проницаемостью $\mu = 500$?

3.130. Магнитная индукция на оси цилиндрической катушки равна B. Как изменится ее значение, если ток катушки уменьшить вдвое, а половину витков закоротить?

3.131. Как изменится магнитный поток, созданный катушкой в магнитной цепи, если в магнитопроводе сделать воздушный зазор величиной δ?

3.132. Число витков катушки без сердечника: а) уменьшили в два раза; б) увеличили в три раза. Как при этом изменился магнитный поток?

3.133. По двум кольцевым катушкам с одинаковым числом витков и одинаковым сечением, но с разными диаметрами проходит ток I. В какой из них поток больше?

3.134. При перемещении проводника в магнитном поле со скоростью v наведенное значение ЭДС равно E. Как надо изменить скорость перемещения, чтобы E осталась той же при увеличении магнитной индукции вдвое?

3.135. Проводник перемещается в плоскости, перпендикулярной направлению поля, со скоростью v. При той же скорости угол плоскости перемещения проводника изменился до $\pi/6$. Как нужно изменить напряженность магнитного поля, чтобы наведенное значение ЭДС осталось прежним?

3.136. Проводник перемещают в поле постоянного магнита перпендикулярно линиям поля. Полюс магнита имеет квадратное сечение со стороной a. Как изменяется наведенная ЭДС в проводнике при неизменной скорости перемещения и изменении его длины: а) $l = a$; б) $l = 3a$; в) $l = 0{,}4a$; г) $l = 10a$; д) $l = 0{,}05a$?

3.137. Металлическая рамка, помещенная в поле постоянного магнита, вращается с постоянной угловой скоростью. Зависит ли наведенная ЭДС от индукции этого магнитного поля?

3.138. Металлическая рамка помещена в магнитное поле с временем изменения его магнитного потока Δt. Время изменения магнитного потока уменьшили в пять раз. Как изменится наведенная при этом ЭДС?

3.139. ЭДС, наведенная в катушке без сердечника с числом витков w, равна E. Как изменится ее значение, если в катушку вставить стальной сердечник?

3.140. Наведенная ЭДС в катушке с числом витков w при некоторой скорости изменения магнитного потока равна E. Скорость изменения потока увеличилась вдвое. Как изменится при этом наведенная ЭДС?

3.141. Катушка с числом витков w помещена в изменяющееся с некоторой скоростью магнитное поле. Как изменятся наведенная ЭДС и потокосцепление катушки, если закоротить половину витков этой катушки?

3.142. К двум последовательно соединенным катушкам L_1 и L_2 параллельно подключена катушка L_3. Определить эквивалентную индуктивность этого соединения.

3.143. Какова эквивалентная индуктивность трех параллельно соединенных катушек индуктивностью L каждая?

3.144. Три индуктивные катушки соединены последовательно, и к ним параллельно подключены еще две катушки. Определить индуктивность всего соединения, если индуктивность каждой катушки L. Как изменится индуктивность соединения, если одну из последовательно соединенных катушек закоротить?

3.145. Две катушки с числом витков w_1 и w_2 соединены последовательно и подключены к источнику. У какой катушки ЭДС самоиндукции больше и во сколько раз, если $w_1 = 4w_2$? Какая катушка обладает большей энергией и почему?

3.146. Зависит ли значение ЭДС самоиндукции от площади поперечного сечения катушки и от ее длины?

3.147. Две катушки с числом витков w_1 и w_2 намотаны на один каркас. Определить

ЭДС, наведенную: а) в первой катушке при изменении тока во второй катушке; б) во второй катушке при изменении тока в первой. Указать, какая из ЭДС больше, если $w_1 < w_2$, а скорость изменения токов I_1 и I_2 одинакова.

3.148. Ток в катушке линейно меняется: а) от 0 до 2 А; б) от 4 до 6 А; в) от 3 А до 0 — за один и тот же промежуток времени. В каком случае ЭДС самоиндукции наибольшая?

3.149. Две катушки имеют различные значения индуктивности L_1 и L_2. При каком условии ЭДС самоиндукции этих катушек одинаковы?

3.150. В каком случае энергия, запасенная в магнитном поле двух катушек, больше: а) при согласном включении; б) при встречном включении катушек?

3.151. Две катушки без сердечника имеют взаимную индуктивность M. Как изменится ее значение, если использовать стальной сердечник ($\mu = 1000$), а число витков каждой катушки уменьшить в 10 раз?

Глава 4

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ И УРАВНЕНИЯ

Переменный электрический ток (ЭДС, напряжение) — это ток (ЭДС, напряжение), изменяющийся с течением времени. Значение этой величины в рассматриваемый момент времени называется мгновенным значением тока (ЭДС, напряжения).

Наиболее распространен переменный синусоидальный ток (ЭДС, напряжение), являющийся синусоидальной функцией времени. Переменный синусоидальный сигнал характеризуется периодом T, выражаемым в секундах (с), или величиной, обратной периоду и называемой частотой электрического тока (ЭДС, напряжения) f, выражаемой в герцах (Гц):

$$f = 1/T, \tag{4.1}$$

или

$$f = pn/60, \tag{4.2}$$

где p — число пар полюсов генератора; n — частота вращения якоря генератора, об/мин.

Мгновенные значения тока, ЭДС, напряжения соответственно:

$$i = I_m \sin(\omega t \pm \Psi_i),$$
$$e = E_m \sin(\omega t \pm \Psi_e), \qquad (4.3)$$
$$u = U_m \sin(\omega t \pm \Psi_u),$$

где i, e, u — мгновенные значения тока, А; ЭДС, В; напряжения, В; I_m, E_m, U_m — амплитудные значения тока, А; ЭДС, В; напряжения, В; ω — угловая частота, 1/с; Ψ_i, Ψ_e, Ψ_u — начальная фаза тока, ЭДС, напряжения; t — время, с.

Угловая частота синусоидального электрического тока (ЭДС, напряжения)

$$\omega = 2\pi f. \qquad (4.4)$$

Начальная фаза тока (ЭДС, напряжения) (Ψ_i, Ψ_e, Ψ_u) — это значение фазы в момент времени $t=0$.

Разность начальных фаз двух синусоидальных величин одной и той же частоты называют сдвигом фаз.

Сдвиг фаз между напряжением и током определяется вычитанием начальной фазы тока из начальной фазы напряжения:

$$\varphi = \Psi_u - \Psi_i. \qquad (4.5)$$

Синусоидально изменяющиеся величины изображают либо графически как функции времени t или угла ωt, либо вращающимися векторами на плоскости. В последнем случае длина вектора в выбранном масштабе представляет собой амплитудное или действующее значение этой величины, угол между этим вектором и положительным направлением оси абсцисс в начальный момент времени равен начальной фазе Ψ, а угловая частота вращения вектора равна уголовой частоте ω.

Совокупность двух и большего числа векторов называют векторной диаграммой. Сложение векторов производят по правилу параллелограмма. Вычитание их — сложение с обратной по знаку вычитаемой величиной.

Действующее значение переменного тока (ЭДС, напряжения) — это среднеквадратичное

значение переменного тока (ЭДС, напряжения) за период T:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2\,dt}. \qquad (4.6)$$

Если ток, ЭДС или напряжение изменяются по синусоидальному закону, то его действующее значение составляет 0,707 амплитудного значения:

$$I = I_m/\sqrt{2} = 0{,}707 I_m,$$
$$E = E_m/\sqrt{2} = 0{,}707 E_m,$$
$$U = U_m/\sqrt{2} = 0{,}707 U_m.$$

Так как действующие значения токов, ЭДС и напряжений пропорциональны амплитудам этих величин, то вектор, выражающий в одном масштабе амплитудное значение, в другом представляет собой действующее значение той же величины. Чаще векторные диаграммы строят в действующих значениях.

ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ С РЕШЕНИЯМИ

4.1. Генератор переменного тока имеет частоту вращения 2800 об/мин. Определить частоту, период и угловую частоту электрического тока, если число пар полюсов генератора равно 6.

Решение. Частота электрического тока генератора

$$f = pn/60 = 6 \cdot 2800/60 = 280 \text{ Гц}.$$

Период $T = 1/f = 1/280 = 0{,}0036$ с и угловая частота

$$\omega = 2\pi/T = 2\pi f = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 280 = 1750 \text{ 1/с}.$$

4.2. Мгновенные значения тока и напряжения потребителя

$$i = 18 \sin(785t - 30°) \text{ А},$$
$$u = 210 \sin 785t \text{ В}.$$

Определить амплитудные и действующие значения тока и напряжения, их начальные фазы. Построить векторную диаграмму для $t=0$.

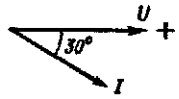

Рис. 4.1

Решение. Амплитудные значения $I_m=18$ А, $U_m=210$ В; действующие значения $I=I_m/\sqrt{2}=18/\sqrt{2}=12{,}9$ А, $U=U_m/\sqrt{2}=210/\sqrt{2}=149$ В.

Начальная фаза тока $\Psi_i=-30°$, напряжения $\Psi_u=0$. На рис. 4.1 представлена векторная диаграмма для $t=0$.

4.3. Напряжение, приложенное к неразветвленной цепи переменного тока, $u=180\sin(\omega t+\pi/4)$ В, ток $i=2{,}7\sin(\omega t-\pi/6)$ А. Определить время и угол сдвига по фазе между ними, их действующие значения, мгновенные значения для $t=0$ и построить векторную диаграмму для момента времени $t=0$, если $f=20$ Гц.

Решение. Угол сдвига по фазе между двумя синусоидально изменяющимися сигналами

$$\varphi=\Psi_u-\Psi_i=\frac{\pi}{4}-\frac{\pi}{6}=\frac{5}{12}\pi=75°.$$

Временной сдвиг

$$\Delta t=\frac{\varphi}{\omega}=\frac{\frac{5}{12}\pi}{2\cdot 20\pi}=\frac{5}{480}=0{,}0104\text{ с}.$$

Действующие значения

$$U=U_m/\sqrt{2}=180/\sqrt{2}=128\text{ В},$$

$$I=I_m/\sqrt{2}=2{,}7/\sqrt{2}=1{,}9\text{ А}.$$

Мгновенные значения тока и напряжения для $t=0$

$$u=180\sin 45°=180\cdot 0{,}707=127\text{ В},$$

$$i=-2{,}7\sin 30°=-2{,}7\cdot 0{,}5=-1{,}35\text{ А}.$$

Векторная диаграмма представлена на рис. 4.2.

4.4. В однородном магнитном поле с индукцией $B=0{,}6$ Тл с частотой $n=1200$ об/мин вращается прямоугольная рамка площадью $S=25$ см^2. Определить максимальную амплитуду наведенной в рамке ЭДС и записать закон изменения ЭДС по времени при условии, что при $t=0$ рамка параллельна линиям магнитной индукции.

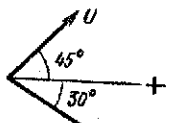

Рис. 4.2

Решение. Частота наведенной в рамке ЭДС

$$f=pn/60=1200/60=20\text{ Гц}.$$

Магнитный поток, пронизывающий рамку,

$$\Phi=BS\cos\alpha=BS\sin\varphi=BS\sin\omega t.$$

Мгновенное значение ЭДС, наведенной в рамке,

$$e=-\frac{d\Phi}{dt}=-\frac{d(BS\sin\omega t)}{dt}=-\omega BS\cos\omega t=-E_m\cos\omega t.$$

Тогда амплитудное значение ЭДС при $\cos\omega t=1$, т. е. $\varphi=0°$,

$$E_m=\omega BS=2\cdot\pi\cdot 20\cdot 0{,}6\cdot 25\cdot 10^{-4}=0{,}188\text{ В},$$

$$e=-0{,}188\cos 125{,}6t.$$

4.5. В двух параллельно включенных приемниках проходят токи $i_1=0{,}5\sin(\omega t+\pi/2)$ А, $i_2=1{,}2\sin(\omega t+\pi/3)$ А. Определить амплитудное значение и начальную фазу тока в неразветвленной цепи и записать выражение для мгновенного значения этого тока.

Решение. Задачу можно решить двумя способами: графически и аналитически. Решим ее аналитически. Амплитуда тока

$$I_m=\sqrt{I_{1m}^2+I_{2m}^2+2I_{1m}I_{2m}\cos(\Psi_1-\Psi_2)}=$$

$$=\sqrt{0{,}5^2+1{,}2^2+2\cdot 0{,}5\cdot 1{,}2\cos 30°}=1{,}65\text{ А}.$$

Найдем начальную фазу искомого тока:

$$\operatorname{tg}\Psi=\frac{I_{1m}\sin\Psi_1+I_{2m}\sin\Psi_2}{I_{1m}\cos\Psi_1+I_{2m}\cos\Psi_2}=\frac{0{,}5+1{,}2\cdot 0{,}866}{1{,}2\cdot 0{,}5}=2{,}56,$$

$$\Psi=68°42'\approx 69°\approx 0{,}38\pi.$$

Мгновенное значение тока

$$i=1{,}65\sin\left(\omega t+\frac{38}{100}\pi\right)\text{А}.$$

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

4.6. Определить период сигнала, если частота переменного тока $f=400$ Гц; 25 кГц; 2 кГц; 40 Гц; 1250 Гц.

4.7. Переменный синусоидальный сигнал имеет период $T=0{,}2$ с; 1,0 с; 40 мс; 50; 250, 0,8 мкс. Определить для этих значений T частоту f.

4.8. Определить угловую частоту синусоидального тока, если период $T=2{,}5\cdot10^{-4}$; 10^{-3}; $20\cdot10^{-2}$; $5\cdot10^{-5}$; $8\cdot10^{-4}$; $4\cdot10^{-6}$ с.

4.9. Угловая частота переменного тока $\omega=3140$; 942; 12 560; 5024; 94 200; 10 048 1/с. Определить частоту и период сигнала.

4.10. Период переменного тока, вырабатываемого генератором, $T=0{,}005$ с. Частота вращения $n=1500$ об/мин. Определить число пар полюсов.

4.11. Два генератора переменного тока работают параллельно на один потребитель, вырабатывая токи одной частоты. Число пар полюсов у первого генератора 3, у второго 4. Определить частоту вращения второго генератора, если у первого $n_1=800$ об/мин.

4.12. Генератор, имеющий 24 полюса, должен выдавать сигнал с частотой $f=28$ Гц. Определить необходимую частоту вращения ротора, его угловую скорость, а также период и угловую частоту выходного сигнала.

4.13. Определить число пар полюсов у генератора с частотой вращения $n_1=900$ об/мин, если он работает параллельно со вторым, имеющим пять пар полюсов и частоту вращения $n_2=1800$ об/мин. Определить частоту сигнала $f=f_1=f_2$.

4.14. Определить частоту вращения ротора генератора переменного тока, имеющего восемь пар полюсов, если $T=1{,}48\cdot10^{-3}$ с.

4.15. Действующее значение переменного тока в цепи $I=10{,}5$ А при частоте $f=1200$ Гц. Определить его амплитудное значение, период и угловую частоту.

4.16. Амплитудное значение напряжения переменного тока с периодом $T=2{,}23$ мс составляет 220 В. Определить действующее значение этого напряжения и его частоту.

4.17. Амплитудное значение переменного тока частотой $f=800$ Гц составляет 450 мА. Определить действующее значение тока, угловую частоту и период.

4.18. Мгновенное значение тока $i=16\sin 157t$ А. Определить амплитудное и действующее значения этого тока и его период.

4.19. Амплитудное значение напряжения, приложенного к цепи, $U_m=120$ В, начальная фаза $\Psi u=\pi/4$. Записать выражение мгновенного значения этого напряжения, определить его действующее значение.

4.20. Действующее значение переменного тока в цепи $I=2{,}9$ А, начальная фаза $\Psi_i=-\frac{2}{3}\pi$. Записать выражение для мгновенного значения тока в цепи и определить его амплитудное значение.

4.21. Мгновенное значение переменного тока в электрической цепи $i=7{,}8\sin(\omega t+\pi/2)$ А. Определить значение постоянного тока, который надо пропустить по той же цепи, чтобы в ней выделилось то же количество теплоты.

4.22. По электрической цепи проходит постоянный ток $I=4{,}4$ А. Определить амплитудное значение тока, который, проходя по той же цепи, выделяет такое же количество теплоты, что и постоянный ток.

4.23. Мгновенное значение ЭДС генератора $e=8{,}45\sin(1256t+\pi/4)$ В. Определить амплитудное и действующее значения ЭДС, угловую частоту, период и начальную фазу. Как изменятся ω, T и Ψ_e генератора, если частота его вращения уменьшится в четыре раза?

4.24. Построить график изменения тока $i=I_m\sin\omega t$ во времени для интервала времени $t=0\div0{,}004$ с через 0,0005 с, если действующее значение тока $I=7{,}1$ А, частота $f=250$ Гц.

Построить график изменения тока в том же интервале времени при условии, что частота: а) увеличилась в пять раз; б) уменьшилась вдвое.

4.25. Действующее значение напряжения $U=128$ В при частоте $f=10$ Гц. Построить график изменения этого напряжения в интервале времени $t=0\div0{,}1$ с через 0,0125 с. Начальная фаза напряжения $\Psi_u=0$. Как изменится график, если начальная фаза $\Psi_u=-\pi/6$?

4.26. Построить графики изменения напряжений и токов для одного периода, если частота изменения напряжения для любого случая $f=100$ Гц, для токов $f=250$ Гц:

1) $u=100\sin\left(\omega t-\frac{2\pi}{3}\right)$ В; 2) $u=40\sin(\omega t-\pi/2)$ В;

3) $u=120\sin\omega t$ В; 4) $u=75\sin\left(\omega t-\frac{3}{4}\pi\right)$ В;

5) $i=3\sin(\omega t+\pi/6)$ А; 6) $i=0{,}5\sin(\omega t-\pi/4)$ А;

7) $i=1{,}4\sin\left(\omega t-\frac{5}{12}\pi\right)$ А; 8) $i=2{,}2\sin\omega t$ А.

В масштабе построить векторы этих же токов и напряжений для $t=0$.

4.27. В электрической цепи переменного тока действуют два напряжения: $u_1=40\sin(\omega t+\pi/2)$ В; $u_2=60\sin(\omega t-\pi/6)$ В. Определить время и сдвиг фаз этих напряжений, а также их действующие значения при частоте сигнала $f=200$ Гц.

4.28. Ток и напряжение на нагрузке, измеренные амперметром и вольтметром, равны соответственно 250 мА и 12,5 В. Ток отстает от напряжения на угол 20°. Записать выражения мгновенных значений этих величин, если начальная фаза тока $\Psi_i=-45°$. Изобразить кривые изменения этих величин и векторную диаграмму для момента времени $t=0$.

4.29. Звуковой генератор выдает сигнал с действующим значением напряжения $U=5$ В. При этом мгновенный ток в потребителе $i=0{,}2\sin 3140t$ А. Записать выражение для мгновенного значения напряжения, если его начальная фаза равна нулю. Представить векторную диаграмму для момента времени $t=0$. Как изменится векторная диаграмма, если частоту повысить в три раза?

4.30. Начальные фазы напряжений U_1 и U_2 составляют соответственно $-60°$ и $+45°$. Записать в общем виде выражения для мгновенных значений и определить фазовый сдвиг этих напряжений. Зарисовать кривые изменения этих напряжений за период и построить векторную диаграмму для $t=0$.

4.31. Синусоидально изменяющийся ток характеризуется действующим значением тока $I=2{,}5$ А, начальной фазой $\Psi_i=-30°$ и частотой $f=500$ Гц. Изобразить в масштабе векторы тока для моментов времени $t=0$, $T/8$, $T/4$, $T/2$.

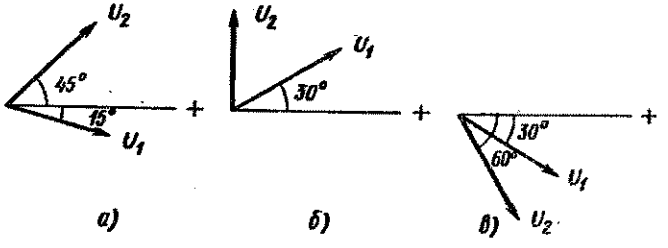

Рис. 4.3

4.32. На рис. 4.3, *а—в* представлены векторные диаграммы для $t=0$ двух напряжений $U_1=40$ В, $U_2=60$ В с периодом $T=4\cdot10^{-6}$ с. Записать выражения для мгновенных значений этих напряжений и построить графики их изменения за период.

4.33. В электрической цепи переменного тока проходит ток $i=I_m\sin(\omega t-\pi/3)$ А. Определить амплитудное и действующее значения тока, если в момент времени $t=0$ мгновенное значение тока $i=12{,}5$ А.

4.34. К электрической цепи переменного тока приложено напряжение $u=380\sin(\omega t+\Psi_u)$ В. Определить начальную фазу напряжения, если мгновенное значение напряжения в момент времени $t=0$ $u=122$ В.

4.35*. В электрической цепи переменного тока проходит ток $i=0{,}8\sin(\omega t-\pi/2)$ А. Определить частоту изменения тока, если при $t=10^{-3}$ с мгновенное значение тока равно нулю. Построить график изменения тока за период.

4.36. Начальная фаза напряжения $U=120$ В равна нулю. Сдвиг по фазе между этим напряжением и током $I=2{,}5$ А $\varphi=-60°$. Записать в общем виде выражения мгновенных значений тока и напряжения и построить векторную диаграмму для $t=0$.

4.37. На двух последовательно соединенных потребителях в цепи переменного тока выделяются соответственно два напряжения: $u_1=20\sin(\omega t+\pi/12)$ В и $u_2=60\sin(\omega t-\pi/4)$ В. Записать выражение мгновенного значения входного напряжения и построить векторную диаграмму для $t=0$. Решить задачу графически и аналитически.

4.38*. Напряжение, приложенное ко входу цепи, состоящей из двух последовательно включенных резисторов, $u_{вх}=200\sin(\omega t+\pi/4)$ В. Напряжение на одном из резисторов $u_1=150\sin(\omega t+\pi/4)$ В. Построить векторную диаграмму для $t=0$ и определить падение напряжения на втором резисторе. Записать выражение для его мгновенного значения.

4.39. Мгновенное значение тока в неразветвленной части цепи $i=1{,}8\sin(\omega t+\pi/18)$ А, ток в первой ветви $i_1=2{,}2\sin(\omega t+\pi/3)$ А. Построить векторную диаграмму токов и записать выражение для мгновенного значения тока во второй параллельной ветви.

4.40. Записать выражение для мгновенного значения тока в неразветвленной части цепи, если мгновен-

ные значения токов в ветвях $i_1 = 15\sin(\omega t - \pi/2)$ А, $i_2 = 12\sin(\omega t - \pi/6)$ А, $i_3 = 3\sin(\omega t + \pi/2)$ А.

4.41*. В электрической цепи переменного тока проходит ток $i = I_m \sin(\omega t + \pi/3)$ А. Мгновенное значение его в момент времени $t = T/4$ $i = 1{,}6$ А. Определить амплитудное и действующее значения тока, частоту, угловую частоту. Построить график изменения тока во времени, если период $T = 0{,}025$ с.

4.42. Действующее значение ЭДС, приложенной к электрической цепи переменного тока, $E = 250$ В. Начальная фаза $\Psi_e = -45°$. Записать выражение для мгновенного значения ЭДС и определить ее значение для момента $t = T/2$, если частота изменения ЭДС $f = 1000$ Гц.

4.43*. На зажимах вторичной обмотки кольца под воздействием переменного магнитного потока в сердечнике, изменяющегося по закону $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, наводится ЭДС. Записать закон изменения этой ЭДС. Определить амплитудное и действующее значения ЭДС, если вторичная обмотка имеет 120 витков, максимальное значение магнитного потока $\Phi_m = 0{,}5 \cdot 10^{-3}$ Вб и частота изменения потока $f = 400$ Гц. Построить векторы ЭДС и потока.

4.44*. В однородном магнитном поле с индукцией $B = 0{,}05$ Тл вращается с частотой $n = 780$ об/мин прямоугольная рамка со сторонами 30 и 80 см. Записать закон изменения магнитного потока, пронизывающего рамку, при условии, что начальное положение рамки $(t = 0)$ параллельно вектору магнитной индукции. Определить период, угловую частоту изменения потока и наибольшее его значение.

4.45. В однородном магнитном поле вращается рамка с частотой $n = 6$ об/с, при этом в ней наводится ЭДС, действующее значение которой $E = 800$ мВ. Определить максимальный магнитный поток, пронизывающий эту рамку.

4.46*. В однородном магнитном поле с магнитной индукцией $B = 1{,}0$ Тл вращается квадратная рамка со стороной 6 см, имеющая 40 витков. Мгновенное значение наведенной ЭДС в момент времени $t = T/6$ $e = 4{,}5$ В. Определить частоту и амплитуду наведенной ЭДС. В момент времени $t = 0$ рамка параллельна линиям магнитной индукции.

4.47. Построить векторы тока и напряжения для момента времени $t = 0$, соответствующие следующим выражениям:

1) $u_1 = 20\sin(\omega t - \pi/3)$ В, $i_1 = 1{,}3\sin(\omega t + \pi/10)$ А,
2) $u_2 = 36\sin(\omega t + \pi/9)$ В, $i_2 = 0{,}6\sin(\omega t - \pi/6)$ А,
3) $u_3 = 12\sin \omega t$ В, $i_3 = 0{,}8\sin(\omega t + \pi/4)$ А,
4) $u_4 = 50\sin(\omega t - \pi/2)$ В, $i_4 = 1{,}8\sin \omega t$ А,
5) $u_5 = 30\sin(\omega t + \pi/12)$ В, $i_5 = \sin(\omega t + \pi/4)$ А,
6) $u_6 = 5\sin(\omega t - \pi/6)$ В, $i_6 = 1{,}5\sin(\omega t - \pi/3)$ А.

Определить действующие значения токов и напряжений и фазовый сдвиг между ними для каждого случая.

КАЧЕСТВЕННЫЕ ЗАДАЧИ

4.48. Период переменного сигнала T. Как нужно изменить частоту сигнала, чтобы T: а) увеличился в три раза; б) уменьшился в два раза; в) увеличился в k раз?

4.49. Частота сигнала переменного тока f. Как изменится частота сигнала, если период: а) уменьшить в k раз; б) увеличить в k раз?

4.50. Частота напряжения переменного тока $f = 100$ Гц. Определить период сигнала и промежуток времени между: а) двумя ближайшими минимальными значениями; б) минимальным и максимальным значениями; в) двумя ближайшими максимальными значениями.

4.51. Соотношение периодов двух сигналов $T_1 : T_2 = n{:}1$ (где $n > 1$ — целое число). Частота какого сигнала больше и во сколько раз?

4.52. Во сколько раз отличаются периоды двух синусоидальных сигналов, если их частоты $f_1 : f_2 = 1 : m$ (где $m > 1$ — целое число)? Какой из периодов больше?

4.53. Напряжение на выходе генератора имеет частоту f. Частоту: а) увеличили в 100 раз; б) уменьшили в 10 раз. Как при этом меняется период выходного напряжения?

4.54. Два генератора синусоидального тока имеют одинаковое число пар полюсов. На рис. 4.4 представлены кривые изменения токов i_1 и i_2. Указать, какой генератор имеет бо́льшую частоту вращения.

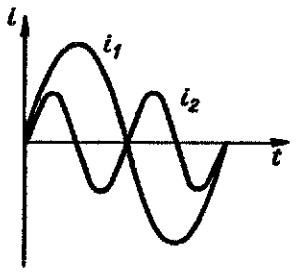

Рис. 4.4

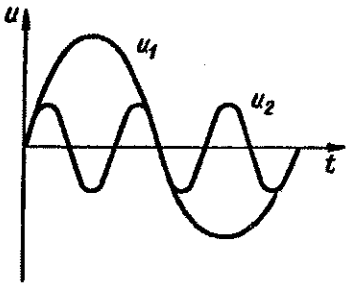

Рис. 4.5

4.55. На рис. 4.5 показано изменение выходного напряжения двух генераторов. Указать, какой из генераторов имеет меньшее число пар полюсов, и их соотношение, если частота вращения у них одинакова.

4.56. Как нужно изменить частоту вращения якоря генератора, чтобы частота выходного напряжения: а) увеличилась в два раза; б) уменьшилась в пять раз?

4.57. Число пар полюсов одного генератора в k раз меньше числа пар полюсов другого генератора. Записать соотношение частот их выходных сигналов, если $n_1 = n_2$.

4.58. Зарисовать кривые изменения токов $i_1 = \sin(314t + \pi/2)$ А, $i_2 = 0{,}5\sin(157t - \pi/6)$ А за период. Определить значения периодов T_1 и T_2.

4.59. Заданы выражения мгновенных значений тока и напряжения $i = 6\sin(471t - \pi/4)$ А, $u = 180\sin(157t + \pi/2)$ В. Можно ли определить фазовый сдвиг между ними?

4.60. Мгновенное значение напряжения $u = U_m \sin(3140t + \pi/2)$ В. Чему равны начальная фаза и период сигнала?

4.61. Амплитуда синусоидального напряжения $U_m = 100$ В, начальная фаза $\Psi_u = -\pi/3$, частота $f = 50$ Гц. Записать выражение для мгновенного значения напряжения.

4.62. Действующее значение ЭДС на выходе генератора $E = 300$ В, период сигнала $T = 0{,}01$ с, $\Psi_E = 0$. Записать выражение для мгновенного значения ЭДС.

4.63. Мгновенное значение тока в нагрузке генератора $i = I_m \sin(\omega t + \Psi_i)$. Записать выражение для мгновенного значения тока, если частота вращения генератора уменьшилась в n раз.

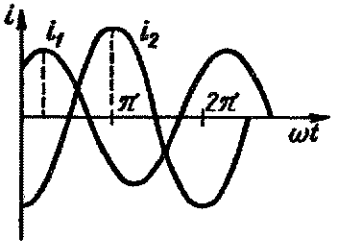

Рис. 4.6

4.64. Мгновенные значения тока и напряжения на нагрузке $i = I_m \sin(\omega t + \pi/4)$ А и $u = v_m \sin(\omega t - \pi/4)$ В. Определить фазовый сдвиг между током и напряжением.

4.65. Мгновенное значение напряжения $u = 564\sin(\omega t - \pi/3)$ В. Фазовый сдвиг между током и напряжением $\varphi = \pi/6$. Записать выражение для мгновенного значения тока, если его действующее значение $I = 10$ А. Определить действующее значение напряжения.

4.66. На рис. 4.6 даны графики изменения токов i_1 и i_2. Определить начальные фазы Ψ_1 и Ψ_2, фазовый сдвиг между ними и построить векторную диаграмму для $t = 0$.

4.67. Начальные фазы токов I_1 и I_2 $\Psi_1 = -\pi/4$, $\Psi_2 = \pi/9$. Зарисовать в общем виде кривые изменения токов за период при $f_1 = f_2$ и определить фазовый сдвиг между ними.

4.68. Построить векторную диаграмму двух напряжений $u_1 = U_{m1}\sin(\omega_1 t + \Psi_1)$, $u_2 = U_{m2}\sin(\omega_2 t + \Psi_2)$ в общем виде при условии, что $f_1 = f_2$.

4.69. На рис. 4. 7 представлена векторная диаграмма токов I_1 и I_2. Записать в общем виде выражения для мгновенных значений этих токов $(f_1 = f_2)$.

4.70. Мгновенное значение напряжения $u = 250\sin(1256t - \pi/8)$ В. Определить U_m, U, f, Ψ_u, ω.

4.71. Действующее значение переменного тока с частотой f, проходящего в нагрузке, равно I. Его начальная фаза $\Psi_i = \pi/4$. Фазовый сдвиг между током и напряжением U в нагрузке составляет $\pi/6$. Записать выражения для мгновенных значений тока и напряжения и построить векторную диаграмму в общем виде для момента времени $t = 0$.

4.72. Как изменятся выражения для мгновенных значений тока и напряжения и векторная диаграмма по условию предыдущей задачи, если начальная фаза тока изменит свой знак на противоположный?

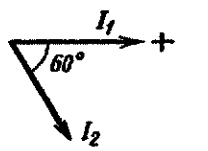

Рис. 4.7

4.73. Записать выражения для мгновенных значений токов и напряжений, заданных в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Варианты	I, А	I_m, А	Ψ_i	T, с	f, Гц	U, В	U_m, В	Ψ_u
1	1	—	$\pi/6$	0,02	—	—	—	—
2	—	—	—	—	50	—	200	$\pi/2$
3	—	—	—	0,1	—	27	—	0
4	—	0,24	$\pi/18$	$5\cdot10^{-5}$	—	—	—	—
5	17	—	—	—	400	—	—	—
6	—	—	—	$25\cdot10^{-4}$	—	43	—	$-\pi/3$

По заданным значениям токов и напряжений в соответствии с табл. 4.1 определить фазовый сдвиг между напряжениями и токами позиций *5—6* и *1—2*, амплитудные или действующие значения токов и напряжений и угловую частоту.

Глава 5
ОДНОФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ И УРАВНЕНИЯ

Цепь переменного тока с активным сопротивлением. Если цепь обладает только активным сопротивлением R (цепь с резистором) и к ее зажимам приложено синусоидально изменяющееся напряжение

$$u = U_m \sin \omega t, \qquad (5.1)$$

то, по закону Ома, мгновенное значение тока в цепи

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t, \qquad (5.2)$$

где U_m — амплитудное значение напряжения, В; $I_m = U_m/R$ — амплитудное значение тока, А.

Действующее значение тока в цепи

$$I = I_m/\sqrt{2} = U_m/(R\sqrt{2}) = U/R. \qquad (5.3)$$

Напряжение и ток в цепи с активным сопротивлением совпадают по фазе, и в любой момент времени мгновенные значения тока и напряжения пропорциональны друг другу.

Средняя за период мощность или активная мощность электрической цепи, выражаемая в ваттах (Вт),

$$P = UI = I^2R = U^2/R. \qquad (5.4)$$

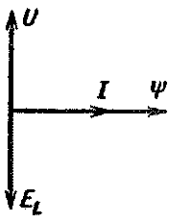

Рис. 5.1

Цепь переменного тока с индуктивностью. Если электрическая цепь обладает только индуктивностью L (активное сопротивление катушки $R=0$) и по ней проходит синусоидальный ток

$$i = I_m \sin \omega t, \qquad (5.5)$$

то, по второму закону Кирхгофа,

$$u = -e = L\frac{di}{dt} = U_{Lm} \cos \omega t, \qquad (5.6)$$

где $U_{Lm} = E_{Lm} = LI_m\omega$.

Следовательно, при синусоидальном токе напряжение на индуктивности по фазе опережает ток на угол $\varphi = \pi/2$. Векторная диаграмма этой цепи представлена на рис. 5.1. Действующее значение напряжения $U = LI\omega$, откуда

$$I = U/(\omega L) = U/X_L, \qquad (5.7)$$

где $X_L = \omega L = 2\pi fL$ — индуктивное сопротивление, Ом.

Цепь с индуктивностью обладает только реактивной мощностью. Максимальное значение реактивной мощности, выражаемое в вольт-амперах (вар),

$$Q = UI = I^2X_L. \qquad (5.8)$$

Неразветвленная цепь переменного тока с активным сопротивлением и индуктивностью. Неразветвленная цепь обладает активным сопротивлением R и индуктивностью L и подключена к источнику синусоидального напряжения. В соответствии со вторым законом Кирхгофа

$$u = iR + L\frac{di}{dt} = u_a + u_L = U_m \sin(\omega t + \varphi), \qquad (5.9)$$

где u_a и u_L — активная и индуктивная составляющие напряжения, В.

Напряжение опережает по фазе ток на угол φ. Амплитудное значение входного напряжения

$$U_m = \sqrt{U_{am}^2 + U_{Lm}^2},$$

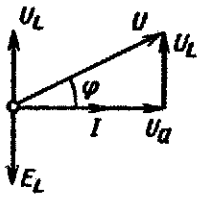

Рис. 5.2

где $U_{am}=I_m R$ — амплитудное значение активной составляющей напряжения, В; $U_{Lm}=LI_m\omega$ — амплитудное значение реактивной составляющей напряжения, В.

Действующее значение напряжения

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

$$=\sqrt{(U_{am}/\sqrt{2})^2+(U_{Lm}/\sqrt{2})^2}=\sqrt{U_a^2+U_L^2}. \quad (5.10)$$

На рис. 5.2 представлена векторная диаграмма цепи, где напряжения U, U_a и U_L образуют треугольник напряжений для активно-индуктивной нагрузки.

Угол сдвига фаз между векторами входного напряжения и тока в цепи определяют из треугольника напряжений:

$$\cos\varphi=U_a/U, \text{ или } \operatorname{tg}\varphi=U_L/U_a. \quad (5.11)$$

Полное сопротивление цепи (Ом)

$$Z=\sqrt{R^2+X_L^2}. \quad (5.12)$$

Ток в цепи

$$I=U/\sqrt{R^2+X_L^2}=U/Z. \quad (5.13)$$

Эта формула выражает закон Ома для действующих значений тока и напряжения цепи с активным сопротивлением и индуктивностью.

Полное сопротивление цепи Z графически изображают гипотенузой прямоугольного треугольника сопротивлений (рис. 5.3), а катетами его являются активное R и индуктивное X_L сопротивления в соответствии с выражением (5.12). Треугольник сопротивлений может быть получен из треугольника напряжений делением всех его сторон на I.

Среднее значение мощности цепи за период равно среднему значению мощности в активном сопротивлении или активной мощности P:

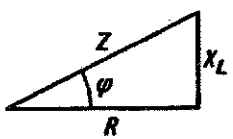

Рис. 5.3

$$P=UI\cos\varphi=U_aI=I^2R. \quad (5.14)$$

Здесь множитель $\cos\varphi$ — коэффициент мощности. В зависимости от его значения при неизменных токе и входном напряжении активная мощность изменяется от нуля (при $\varphi=\pi/2$) до максимального значения (при $\varphi=0$).

Реактивная мощность

$$Q_L=UI\sin\varphi=U_LI=I^2X_L. \quad (5.15)$$

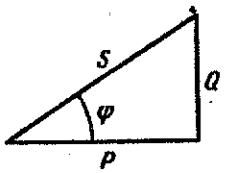

Рис. 5.4

Произведение действующих значений входного напряжения и тока называют полной мощностью (В·А):

$$S=UI. \quad (5.16)$$

Активную, реактивную и полную мощности изображают сторонами прямоугольного треугольника мощностей (рис. 5.4), тогда

$$S=\sqrt{P^2+Q^2}. \quad (5.17)$$

Цепь с емкостью. Если электрическая цепь обладает только емкостью (конденсатор без потерь) и к ней приложено напряжение u переменного тока, то в цепи проходит ток

$$i=C\frac{du}{dt}=CU_m\omega\cos\omega t=I_m\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right), \quad (5.18)$$

где $u=U_m\sin\omega t$, т. е. ток в такой цепи опережает напряжение на угол $\pi/2$.

Амплитудное значение тока в цепи

$$I_m=CU_m\omega=U_m/X_C, \quad (5.19)$$

где C — емкость конденсатора, Ф; $X_C=1/(\omega C)$ — емкостное сопротивление, Ом. Действующее значение

$$I=U/X_C. \quad (5.20)$$

Цепь обладает реактивной мощностью

$$Q=UI. \quad (5.21)$$

Цепь с активным сопротивлением и емкостью. Если в цепи с последовательно соединенным резистором и конденсатором проходит ток $i=I_m\sin\omega t$, то напряжение на активном сопротивлении u_a совпадает по фазе с током, а напряжение u_c на конденсаторе отстает от тока на угол $\pi/2$.

Напряжение на зажимах цепи

$$u=u_a+u_c=U_m\sin(\omega t-\varphi). \quad (5.22)$$

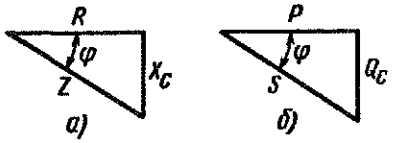

Рис. 5.5

Амплитуда этого напряжения

$$U_m=\sqrt{U_{am}^2+U_{Cm}^2}. \quad (5.23)$$

Действующее значение напряжения

$$U=\sqrt{U_a^2+U_C^2}, \text{ или } U=I\sqrt{R^2+X_C^2}=IZ. \quad (5.24)$$

Закон Ома для действующих значений тока и напряжения

$$I=U/\sqrt{R^2+X_C^2}=U/Z, \quad (5.25)$$

где Z — полное сопротивление цепи.

Сопротивления Z, R и X_C графически изображают сторонами треугольника сопротивлений для активно-емкостной нагрузки (рис. 5.5, *а*).

Активную, реактивную и полную мощности цепи с активным сопротивлением и емкостью (P, Q и S), а также фазовый сдвиг определяют аналогично тому, как это делалось для неразветвленной цепи с индуктивным и активным сопротивлениями. Мощности P, Q и S образуют стороны треугольника мощностей (рис. 5.5, *б*).

Цепь с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью. Если в цепи с последовательно соединенными активным сопротивлением R, индуктивностью L и емкостью C проходит синусоидальный ток, то мгновенное значение напряжения на зажимах этой цепи равно сумме мгновенных значений трех составляющих:

$$u=u_a+u_L+u_C.$$

Амплитуда этого напряжения

$$U_m=\sqrt{U_{am}^2+(U_{Lm}-U_{Cm})^2}. \quad (5.26)$$

Действующее значение

$$U=\sqrt{U_a^2+(U_L-U_C)^2}, \quad (5.27)$$

или

$$U=\sqrt{(IR)^2+(IX_L-IX_C)^2}=I\sqrt{R^2+(X_L-X_C)^2}=IZ,$$

$$Z=U/I=\sqrt{R^2+(X_L-X_C)^2}=\sqrt{R^2+X^2}, \quad (5.28)$$

где $X=X_L-X_C$ — реактивное сопротивление цепи.

На рис. 5.6, *а*, *б* представлены векторная диаграмма и треугольник сопротивлений неразветвленной цепи RLC при $X_L>X_C$.

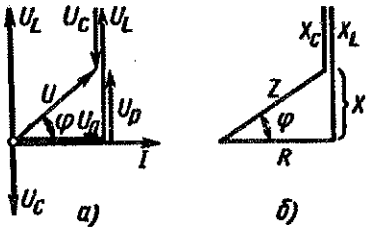

Рис. 5.6

Из векторной диаграммы или треугольника сопротивлений можно определить сдвиг по фазе между напряжением и током:

$$\varphi=\operatorname{arctg}\frac{U_L-U_C}{U_a}=\operatorname{arctg}\frac{X}{R}, \quad (5.29)$$

или

$$\cos\varphi=U_a/U=R/Z, \quad (5.30)$$

$$\sin\varphi=(U_L-U_C)/U=(X_L-X_C)/Z=X/Z. \quad (5.31)$$

Мощности цепи:
активная

$$P=UI\cos\varphi; \quad (5.32)$$

реактивная

$$Q=UI\sin\varphi; \quad (5.33)$$

полная

$$S=\sqrt{P^2+Q^2}=UI. \quad (5.34)$$

Резонанс напряжений. В неразветвленной цепи RLC при равенстве реактивных сопротивлений $X_L=X_C$ наступает резонанс напряжений

$$\omega L=1/(\omega C), \quad (5.35)$$

откуда угловая резонансная частота

$$\omega_0=1/\sqrt{LC}, \quad (5.36)$$

резонансная частота

$$f_0=1/(2\pi\sqrt{LC}). \quad (5.37)$$

Полное сопротивление цепи при резонансе напряжений равно активному сопротивлению и приобретает минимальное значение

$$Z=\sqrt{R^2+(X_L-X_C)^2}=R. \quad (5.38)$$

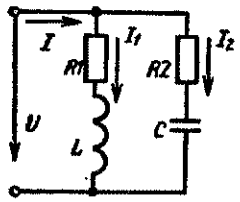

Рис. 5.7

Ток в цепи при постоянстве действующего значения входного напряжения U имеет наибольшее значение $I=U/R$ и совпадает по фазе с напряжением, т. е. $\varphi=0$ и коэффициент мощности $\cos\varphi=1$.

При резонансе напряжений падения напряжений U_L и U_C находятся в противофазе, равны между собой $U_L=U_C$ и приобретают максимальное значение.

Цепь с параллельными ветвями. Разветвленная цепь, состоящая из двух ветвей, представлена на рис. 5.7. Такая цепь может быть рассчитана с помощью проводимостей; ток в каждой ветви можно представить двумя составляющими: активной I_a и реактивной I_p.

Активная составляющая тока совпадает по фазе с приложенным напряжением

$$I_a=I\cos\varphi=U\frac{R}{Z^2}=Ug, \qquad (5.39)$$

где $g=R/Z^2$ — активная проводимость ветви, 1/Ом.

Реактивная составляющая тока

$$I_p=I\sin\varphi=U\frac{X}{Z^2}=Ub, \qquad (5.40)$$

где $b=X/Z^2$ — реактивная проводимость ветви, 1/Ом.

Реактивная составляющая тока сдвинута относительно приложенного напряжения на угол $(\pm\pi/2)$.

Действующие значения токов I_1 и I_2 в ветвях

$$I_1=U/Z_1=Uy_1, \quad I_2=U/Z_2=Uy_2, \qquad (5.41)$$

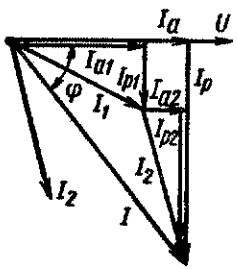

Рис. 5.8

где y_1 и y_2 — полные проводимости ветвей.

Токи в ветвях и их составляющие представлены на векторной диаграмме сторонами прямоугольного треугольника токов (рис. 5.8), тогда

$$I_1=\sqrt{I_{a1}^2+I_{p1}^2}=U\sqrt{g_1^2+b_1^2}, \qquad (5.42)$$
$$I_2=\sqrt{I_{a2}^2+I_{p2}^2}=U\sqrt{g_2^2+b_2^2}.$$

Полная проводимость каждой ветви

$$y_1=\sqrt{g_1^2+b_1^2}, \quad y_2=\sqrt{g_2^2+b_2^2}. \qquad (5.43)$$

Полная проводимость всей цепи

$$y=\sqrt{g^2+b^2}, \qquad (5.44)$$

где $g=g_1+g_2$ — активная проводимость всей цепи, равная арифметической сумме активных проводимостей ветвей; $b=b_1+b_2$ — реактивная проводимость всей цепи, равная алгебраической сумме реактивных проводимостей ветвей.

Действующее значение тока в неразветвленной части цепи

$$I=Uy. \qquad (5.45)$$

Сдвиг по фазе между напряжением и током

$$\operatorname{tg}\varphi=b/g \quad \text{или} \quad \sin\varphi=b/y. \qquad (5.46)$$

Мощности цепи:

активная

$$P=UI\cos\varphi=U^2g; \qquad (5.47)$$

реактивная

$$Q=UI\sin\varphi=U^2b. \qquad (5.48)$$

полная

$$S=UI=\sqrt{P^2+Q^2}=U^2y. \qquad (5.49)$$

Резонанс токов. В цепи (см. рис. 5.7) можно получить резонанс токов при условии равенства реактивных проводимостей $b_L=b_C$, тогда полная проводимость цепи $y=\sqrt{g^2+b^2}=g$ (так как $b=b_L-b_C=0$), т. е. равна активной проводимости. Угол сдвига фаз между током и напряжением в неразветвленной части цепи равен нулю, так как реактивные составляющие токов в ветвях I_{p1} и I_{p2} равны между собой и находятся в противофазе. Ток в неразветвленной части цепи является активным: $I=I_a=U(g_1+g_2)=Ug$.

При резонансе токов реактивные мощности Q_1 и Q_2 равны, а так как $Q_1=U^2b_1$ и $Q_2=U^2b_2$ имеют разные знаки, то цепь обладает только активной мощностью.

ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ С РЕШЕНИЯМИ

5.1. Фазовый сдвиг φ между напряжением на индуктивной катушке и током $i=7\sin(628t+45°)$ А равен 30°, при этом активная мощность $P=160$ Вт. Определить полное, активное и реактивное сопротивления катушки, ее индуктивность, полную и реактивную мощности. Записать выражение для мгновенных значений напряжения на катушке, на ее активном и индуктивном сопротивлениях. Построить векторную диаграмму для момента времени $t=0$.

Решение. Действующее значение напряжения на катушке

$$U=\frac{P}{I\cos\varphi}=\frac{160}{(7/\sqrt{2})\cdot 0{,}866}=37{,}2\text{ В}.$$

Сопротивления катушки:

полное

$$Z=U/I=37{,}2/(7/\sqrt{2})=7{,}5\text{ Ом};$$

индуктивное

$$X_L=Z\sin\varphi=7{,}5\cdot 0{,}5=3{,}75\text{ Ом};$$

активное

$$R=\sqrt{Z^2-X_L^2}=Z\cos\varphi=7{,}5\cdot 0{,}866=6{,}5\text{ Ом}.$$

Индуктивность катушки

$$L=X_L/\omega=3{,}75/628=6\cdot 10^{-3}\text{ Гн}=6\text{ мГн}.$$

Мощности:

полная

$$S=UI=37{,}2\cdot\frac{7}{\sqrt{2}}=185\text{ В}\cdot\text{А},$$

реактивная

$$Q=\sqrt{S^2-P^2},\text{ или }Q=UI\sin\varphi,$$

$$Q=37{,}2(7/\sqrt{2})0{,}5=92{,}5\text{ вар}.$$

Выражения для мгновенных значений напряжений:
а) на катушке

$$u=U_m\sin(628t\pm\Psi_u),$$

$$U_m=U\sqrt{2}=37{,}2\sqrt{2}=52{,}5\text{ В},$$

$$\Psi_u=\Psi_i+\varphi=45°+30°=75°,$$

тогда

$$u=52{,}5\sin(628t+75°)\text{ В};$$

б) на активном сопротивлении катушки

$$u_R=U_{Rm}\sin(628t+45°),$$

$$U_{Rm}=U_R\sqrt{2}=I_mR=7\cdot 6{,}5=45{,}5\text{ В},$$

тогда

$$u_R=45{,}5\sin(628t+45°)\text{ В};$$

в) на индуктивном сопротивлении катушки

$$u_L=L\frac{di}{dt}=6\cdot 10^{-3}\cdot 628\cdot 7\cos(628t+45°)=$$

$$=26\sin(628t+135°)\text{ В}.$$

Для построения векторной диаграммы определяем действующие значения

$$U_R=IR=(7/\sqrt{2})\cdot 6{,}5=32{,}2\text{ В},$$

$$U_L=IX_L=(7/\sqrt{2})\cdot 3{,}75=18{,}6\text{ В}$$

и выбираем масштаб по напряжению и току. Затем по горизонтали откладываем положительное направление оси абсцисс и строим под углом $\Psi_I=45°$ к ней вектор тока $\mathbf{I}$ (рис. 5.9). По направлению этого вектора откладываем в масштабе вектор напряжения $\mathbf{U}_R$. Вектор напряжения $\mathbf{U}_L$ откладываем под углом 90° в сторону опережения вектора тока $\mathbf{I}$. Складывая эти векторы, получим в выбранном масштабе вектор напряжения $\mathbf{U}$, приложенного к катушке.

5.2. Полное сопротивление цепи, состоящей из последовательно соединенных резистора и конденсатора, $Z=320$ Ом, активная мощность цепи $P=17$ Вт. Определить сопротивление резистора, емкость конденсатора, полную потребляемую мощность, действующие значения тока и входного напряжения, если напряжение на резисторе $u_R=60\sin(2512t+80°)$ В.

Определить активную и реактивную составляющие тока. Записать выражения для мгновенных значений тока и напряжения в цепи и напряжения на конденсаторе.

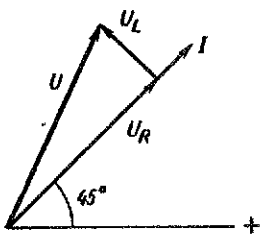

Рис. 5.9

Решение. Действующее значение тока в цепи

$$I = P/U_R, \text{ где } U_R = U_{mR}/\sqrt{2} = 60/\sqrt{2} = 42{,}5 \text{ В},$$

откуда

$$I = 17/42{,}5 = 0{,}4 \text{ А}.$$

Действующее значение входного напряжения

$$U_{вх} = IZ = 0{,}4 \cdot 320 = 128 \text{ В}.$$

Действующее значение напряжения на конденсаторе

$$U_C = \sqrt{U_{вх}^2 - U_R^2} = \sqrt{128^2 - (42{,}5)^2} = 116{,}5 \text{ В};$$

следовательно, сопротивление конденсатора

$$X_C = U_C/I = 116{,}5/0{,}4 = 290 \text{ Ом}$$

и

$$C = 1/(\omega X_C) = 1/(2512 \cdot 290) = 1{,}37 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}.$$

Активное сопротивление резистора

$$R = U_R/I = 42{,}5/0{,}4 = 106 \text{ Ом},$$

или

$$R = P/I^2 = 17/(0{,}4)^2 = 106 \text{ Ом}.$$

Полная потребляемая мощность

$$S = U_{вх}I = 128 \cdot 0{,}4 = 51 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Активная составляющая тока

$$I_a = I\cos\varphi = I\frac{U_R}{U_{вх}} = 0{,}4\,\frac{42{,}5}{128} = 0{,}133 \text{ А}.$$

Реактивная составляющая тока

$$I_p = I\sin\varphi = I\frac{U_C}{U_{вх}} = 0{,}4\,\frac{116{,}5}{128} = 0{,}365 \text{ А}.$$

Мгновенное значение тока в цепи

$$i = u_R/R = (60/106)\sin(2512t + 80°) = 0{,}565\sin(2512t + 80°) \text{ А}.$$

Мгновенные значения напряжений:
на входе цепи

$$u_{вх} = U_{вх}\sqrt{2}\sin(2512t + 80° - \varphi),$$
$$\varphi = 69°\,54' \approx 70°,$$
$$u_{вх} = 180\sin(2512t + 10°) \text{ В};$$

на конденсаторе

$$u_C = U_C\sqrt{2}\sin(2512t + 80° - 90°) = 164\sin(2512t - 10°) \text{ В}.$$

5.3. По электрической цепи, состоящей из последовательно включенных катушки с активным сопротивлением $R = 30$ Ом и индуктивностью $L = 16{,}5$ мГн и конденсатора емкостью $C = 10{,}6$ мкФ, приходит ток $i = 1{,}3\sin(1884t - 45°)$ А.

Определить полное сопротивление цепи, действующие значения входного напряжения и тока, полную потребляемую мощность. Записать выражения для мгновенных значений напряжений на входе цепи, активном, индуктивном и емкостном сопротивлениях. Построить векторную диаграмму.

Решение. Действующее значение тока в цепи

$$I = I_m/\sqrt{2} = 1{,}3/\sqrt{2} = 0{,}92 \text{ А}.$$

Сопротивления цепи:
индуктивное

$$X_L = \omega L = 1884 \cdot 16{,}5 \cdot 10^{-3} = 31{,}2 \text{ Ом};$$

емкостное

$$X_C = 1/(\omega C) = 1/(1884 \cdot 10{,}6 \cdot 10^{-6}) = 50 \text{ Ом};$$

полное

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{30^2 + (18{,}8)^2} = 35{,}4 \text{ Ом}.$$

Действующее значение входного напряжения

$$U_{вх} = IZ = 0{,}92 \cdot 35{,}4 = 32{,}6 \text{ В}.$$

Полная потребляемая мощность

$$S = UI = 32{,}6 \cdot 0{,}92 = 30 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Мгновенные значения напряжений:
входного

$$u_{вх} = U_m\sin(\omega t + \Psi_u),$$
$$\Psi_u = \Psi_i + \varphi, \text{ где } \Psi_i = -45°,$$
$$\varphi = \operatorname{arctg}\frac{X_L - X_C}{R} = \operatorname{arctg}\frac{-18{,}8}{30},$$
$$\varphi = -32°\,18' \approx -32°,$$
$$\Psi_u = -45° - 32° = -77°,$$

тогда

$$u_{вх} = U\sqrt{2}\sin(1884t - 77°) = 46\sin(1884t - 77°) \text{ В};$$

на активном сопротивлении катушки

$$u_R = I_m R \sin(\omega t + \Psi_i) = 39 \sin(1884t - 45°) \text{ В};$$

на индуктивном сопротивлении катушки

$$u_L = L\frac{di}{dt} = L\frac{d[1{,}3\sin(1884t-45°)]}{dt} =$$
$$= \omega L\, 1{,}3 \sin(1884t - 45° + 90°),$$

или

$$u_L = X_L I_m \sin(\omega t + 45°) = 40{,}5 \sin(1884t + 45°) \text{ В};$$

на конденсаторе

$$u_C = \frac{1}{C}\int i\,dt = \frac{1}{C}\int 1{,}3\sin(1884t - 45°) =$$
$$= 1{,}3 X_C \sin(1884t - 45° - 90°),$$
$$u_C = 1{,}3 \cdot 50 \sin(1884t - 135°) = 65 \sin(1884t - 135°) \text{ В}.$$

Для построения векторной диаграммы определяем действующие значения $U_L = 40{,}5/\sqrt{2} = 29$ В, $U_C = 65/\sqrt{2} = 45{,}2$ В, $U_R = 39/\sqrt{2} = 27{,}6$ В и выбираем масштаб по напряжению.

Проводим горизонтальную ось и под углом $\Psi_i = -45°$ к ней проводим вектор тока $\mathbf{I}$. По направлению этого тока в масштабе откладываем вектор $\mathbf{U}_R$, затем под углами $\Psi_L = 45°$ и $\Psi_C = -135°$ к горизонтальной оси откладываем векторы $\mathbf{U}_L$ и $\mathbf{U}_C$. Сложив их ($\mathbf{U}_R$, $\mathbf{U}_L$, $\mathbf{U}_C$), получим в выбранном масштабе вектор входного напряжения $\mathbf{U}_{вх}$ (рис. 5.10).

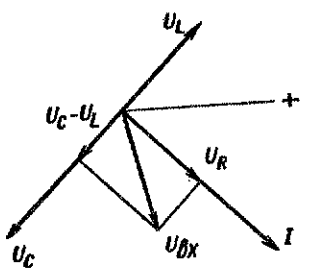

Рис. 5.10

5.4. По цепи, состоящей из последовательно соединенных индуктивной катушки, полное сопротивление которой составляет 30,5 Ом, и конденсатора емкостью 4,8 мкФ, проходит ток $i = 2{,}7 \sin(3454t + 40°)$ А, активная мощность этой цепи $P = 35{,}7$ Вт. Определить индуктивность катушки, ее активное сопротивление, полное сопротивление цепи, действующее значение приложенного напряжения на входе, полную и реактивную мощности цепи. Определить частоту, при которой в цепи

наступит резонанс напряжений, ее полное сопротивление и действующее значение тока в цепи. Определить полную, активную и реактивную мощности цепи при резонансе, записать выражение для мгновенного значения входного напряжения до резонанса и в момент резонанса. Построить векторную диаграмму для двух указанных режимов работы цепи при $t = 0$.

Р е ш е н и е. Сопротивления катушки:

активное

$$R_к = P/I^2 = P/(I_m/\sqrt{2})^2 = 35{,}7 \cdot 2/2{,}7^2 = 9{,}8 \text{ Ом};$$

реактивное

$$X_L = \sqrt{Z_к^2 - R_к^2} = \sqrt{(30{,}5)^2 - (9{,}8)^2} = 29 \text{ Ом}.$$

Индуктивность катушки

$L = X_L/\omega$, $\omega = 3454$ с$^{-1}$, $L = 29/3454 = 8{,}4 \cdot 10^{-3}$ Гн.

Так как

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{3454 \cdot 4{,}8 \cdot 10^{-6}} = -60{,}3 \text{ Ом},$$

то полное сопротивление цепи

$$Z = \sqrt{R_к^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{(9{,}8)^2 + (31{,}3)^2} = 32{,}8 \text{ Ом}.$$

Действующее значение напряжения на входе

$$U_{вх} = IZ = \frac{I_m}{\sqrt{2}} Z = \frac{2{,}7}{\sqrt{2}} \cdot 32{,}8 = 62{,}6 \text{ В}.$$

Реактивная мощность цепи

$$Q = I^2 (X_L - X_C) = (I_m/\sqrt{2})^2 (X_L - X_C) =$$
$$= -(2{,}7/\sqrt{2})^2\, 31{,}3 = -(3{,}64 \cdot 31{,}3) = -113{,}9 \text{ вар}.$$

Полная мощность цепи

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(35{,}7)^2 + (113{,}9)^2} = 119{,}5 \text{ В} \cdot \text{А},$$

или

$$S = U_{вх} I = U_{вх} \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 62{,}6 \frac{2{,}7}{\sqrt{2}} = 119{,}5 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Частота при резонансе

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \text{ так как } \omega L = 1/(\omega C),$$

$$f_0=\frac{1}{2\cdot3{,}14\sqrt{8{,}4\cdot10^{-3}\cdot4{,}8\cdot10^{-6}}}=\frac{1}{2\cdot3{,}14\cdot10^{-4}\sqrt{4{,}02}}=796\ \text{Гц}.$$

Полное сопротивление цепи в момент резонанса $Z=R_к$, так как $X_L=X_C$, $Z=9{,}8$ Ом.

Действующее значение тока в цепи при резонансе

$$I_{рез}=U_{вх}/Z=U_{вх}/R_к=62{,}6/9{,}8=6{,}39\ \text{А}.$$

Активная мощность цепи при резонансе

$$P=I^2R_к=6{,}39^2\cdot9{,}8=400\ \text{Вт}$$

и равна полной мощности: $S=P$, т. е. $S=U_{вх}I_{рез}=62{,}6\cdot6{,}39=400\ \text{В}\cdot\text{А}$.

Реактивная мощность цепи $Q=0$.

Мгновенное значение входного напряжения до резонанса

$$u_{вх}=U_{вх}\sqrt{2}\sin(\omega t+\Psi_u)\ \text{В},\quad \Psi_u=\Psi_i+\varphi,$$

где

$$\Psi_i=40^\circ,\quad \varphi=\operatorname{arctg}\frac{X_L-X_C}{R_к}=\frac{29-60{,}3}{9{,}8}=\operatorname{arctg}-3{,}193,$$

$$\varphi=-72^\circ40'\approx-73^\circ,$$

тогда

$$\Psi_u=40^\circ-73^\circ=-33^\circ$$

и

$$u_{вх}=62{,}6\sqrt{2}\sin(3454t-33^\circ)\ \text{В}=88{,}3\sin(3454t-33^\circ)\ \text{В}.$$

При резонансе $\varphi=0$ и $\Psi_u=\Psi_i$, тогда

$$u_{вх}=88{,}3\sin(\omega_0t+\Psi_u)\ \text{В},$$

$$\omega_0=2\pi f_0=2\cdot3{,}14\cdot796=5000\ \text{с}^{-1},$$

$$u_{вх}=88{,}3\sin(5000t+40^\circ)\ \text{В}.$$

Для построения векторных диаграмм для двух режимов работы цепи необходимо определить действующие значения напряжений U_R, U_L и U_C до резонанса и в момент резонанса:

а) до резонанса

$$U_R=IR_к=(2{,}7/\sqrt{2})9{,}8=18{,}8\ \text{В},$$
$$U_L=IX_L=(2{,}7/\sqrt{2})29=55{,}5\ \text{В},$$
$$U_C=IX_C=(2{,}7/\sqrt{2})60{,}3=116\ \text{В};$$

б) в момент резонанса

$$U_R=I_{рез}R_к=6{,}39\cdot9{,}8=63\ \text{В},$$

$$U_L=I_{рез}X_L=U_C=I_{рез}X_C,$$

$$X_L=\omega_0L=f_0\,2\pi L=2\cdot3{,}14\cdot796\cdot8{,}4\cdot10^{-3}=42\ \text{Ом},$$

$$U_L=U_C=6{,}39\cdot42=278\ \text{В}.$$

Построение векторных диаграмм произвести по методике, указанной в задаче 5.3. Необходимо обратить внимание на то, что при построении векторной диаграммы при резонансе вектор входного напряжения совпадает по направлению с вектором тока ($\varphi=0$): $\mathbf{U}_{вх}=\mathbf{U}_R$.

5.5. К источнику переменного тока с частотой $f=1500$ Гц и действующим значением напряжения $U=10$ В подключена катушка, обладающая индуктивностью $L=0{,}08$ Гн и активным сопротивлением $R=400$ Ом. Параллельно ей включен конденсатор переменной емкости. Определить значение этой емкости для получения в цепи резонанса тока, полную проводимость цепи и параллельных ветвей, токи в них, активную и реактивную составляющие токов, полную потребляемую мощность, если действующее значение тока в неразветвленной части цепи $I=50$ мА: Построить векторную диаграмму токов и напряжений.

Р е ш е н и е. Условием резонанса токов является

$$b_L=b_C\ \text{или}\ X_L/Z_1^2=X_C/Z_2^2,\ \text{откуда}\ C=X_L/(Z_1^2\omega),$$

где Z_1 — полное сопротивление ветви с индуктивной катушкой:

$$Z_1^2=R_к^2+X_L^2=(400)^2+(750)^2=800\ 000\ \text{Ом}^2,$$

здесь $X_L=2\pi fL=2\cdot3{,}14\cdot1500\cdot0{,}08=750$ Ом; Z_2 — полное сопротивление ветви с конденсатором: $Z_2=X_C=1/(\omega C)$.

Определяем емкость конденсатора для получения резонанса токов в цепи: $C=X_L/(Z_1^2\omega)=750/(800\ 000\times\times9450)=0{,}0995\cdot10^{-6}\ \Phi\approx0{,}1$ мкФ.

Полная проводимость:

ветви с индуктивностью

$$y_1=\sqrt{g_1^2+b_1^2},$$
$$g_1=R_к/Z_1^2=400/(8\cdot10^5)=0{,}5\cdot10^{-3}\ \text{Ом}^{-1},$$
$$b_1=b_L=X_L/Z_1^2=750/(8\cdot10^5)=0{,}945\cdot10^{-3}\ \text{Ом}^{-1},$$
$$y_1=\sqrt{(0{,}5\cdot10^{-3})^2+(0{,}945\cdot10^{-3})^2}=1{,}06\cdot10^{-3}\ \text{Ом}^{-1};$$

второй ветви с конденсатором

$$y_2=b_2=b_C=-\omega C=-9450\cdot0{,}1\cdot10^{-6}=$$
$$=-0{,}945\cdot10^{-3}\ \text{Ом}^{-1};$$

цепи

$$y=\sqrt{(g_1+g_2)^2+(b_1+b_2)^2},$$
$$g_1+g_2=g_1=0{,}5\cdot10^{-3}\ \text{Ом}^{-1},$$
$$b_1+b_2=b_L-b_C=0,$$
$$y=g_1=0{,}5\cdot10^{-3}\ \text{Ом}^{-1}.$$

Действующее значение напряжения на входе

$$U_{вх}=I/y=0{,}05/(0{,}5\cdot10^{-3})=100\ \text{В}.$$

Ток в первой ветви

$$I_1=U_{вх}y_1=100\cdot1{,}06\cdot10^{-3}=0{,}106\ \text{А}.$$

Ток во второй ветви

$$I_2=U_{вх}y_2=100\cdot0{,}945\cdot10^{-3}=0{,}0945\ \text{А}.$$

Активная и реактивная составляющие тока I_1

$$I_{a1}=U_{вх}g_1=100\cdot0{,}5\cdot10^{-3}=0{,}05\ \text{А},$$
$$I_{p1}=U_{вх}b_1=100\cdot0{,}945\cdot10^{-3}=0{,}0945\ \text{А}.$$

Ток I_2 имеет только реактивную составляющую. При резонансе:

$$I_{p2}=0{,}0945\ \text{А}=I_{p1}.$$

При резонансе полная потребляемая мощность цепи $S=P$, т. е.

$$S=UI=100\cdot0{,}05=5\ \text{В}\cdot\text{А}$$

или

$$P=U_{вх}^2g=100^2\cdot0{,}5\cdot10^{-3}=5\ \text{Вт},$$
$$Q_1=U_{вх}^2b_1=100^2\cdot0{,}945\cdot10^{-3}=9{,}45\ \text{вар},$$
$$Q_2=U_{вх}^2b_2=100^2\cdot0{,}945\cdot10^{-3}=-9{,}45\ \text{вар},$$
$$S=\sqrt{(P_1+P_2)^2+(Q_1+Q_2)^2}=P=5\ \text{Вт}.$$

Построение векторной диаграммы начинается с выбора масштаба токов. В горизонтальном направлении откладываем вектор входного напряжения $\mathbf{U}_{вх}$ (рис. 5.11), по направлению этого вектора откладываем $\mathbf{I}_{a1}$, под углом $\pi/2$ в сторону опережения вектора $\mathbf{U}_{вх}$ откладываем вектор $\mathbf{I}_{p2}$, под углом $\pi/2$ в сторону отставания — вектор $\mathbf{I}_{p1}$. Складывая эти векторы, в масштабе получаем вектор тока $\mathbf{I}$ в неразветвленной части цепи. Фазовый сдвиг между током и напряжением $\varphi=0$.

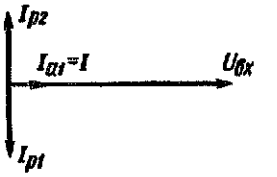

Рис. 5.11

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

5.6. В цепь переменного тока включен резистор. Действующие значения тока и напряжения на нем $I=350$ мА и $U=42$ В. Определить сопротивление резистора, выделившуюся на нем мощность, а также амплитудное значение тока.

5.7. По резистору сопротивлением $R=20$ Ом проходит ток $i=0{,}75\sin\omega t$ А. Определить мощность, амплитудное и действующее значения падения напряжения на резисторе, записать выражение мгновенного значения этого напряжения и построить векторную диаграмму токов и напряжений для $t=0$.

5.8. К резистору сопротивлением $R=1{,}5$ кОм приложено напряжение $u=120\sin(\omega t-\pi/6)$ В. Записать выражение для мгновенного значения тока, определить его амплитудное и действующее значения, мощность. Построить векторную диаграмму для момента времени $t=0$.

5.9. В цепи переменного тока через резистор проходит ток $i=0{,}4\sin(\omega t+\pi/2)$ А, при этом действующее значение падения напряжения $U=28{,}4$ В. Определить сопротивление резистора и мощность, выделившуюся на нем. Записать выражение мгновенного значения напряжения и построить кривые изменения тока и напряжения, если частота изменения сигнала $f=100$ Гц.

5.10. Действующие значения тока и напряжения на резисторе $I=125$ мА и $U=250$ В. Частота изменения сигнала $f=400$ Гц, начальная фаза тока $\Psi_i=-\pi/6$. Записать выражения для мгновенных

значений тока, напряжения и мощности, построить кривые изменения этих величин во времени. Определить сопротивление резистора и выделившуюся на нем мощность.

5.11. На резисторе сопротивлением $R=3{,}2$ Ом, включенном в цепь переменного тока, выделяется мощность $P=20$ Вт. Определить действующее и амплитудное значения тока и напряжения.

5.12. Через резистор сопротивлением $R=51$ Ом проходит ток с действующим значением $I=0{,}5$ А. Его начальная фаза равна нулю. Записать выражение мгновенного значения напряжения и мощности. Построить векторную диаграмму.

5.13*. Действующее значение переменного напряжения U, измеренное на резисторе сопротивлением $R=1{,}2$ кОм, составляет 820 мВ. Начальная фаза $\Psi_u=\pi/6$ частота $f=150$ Гц. Определить амплитудное и действующее значения тока в резисторе, записать выражение для его мгновенного значения. Зарисовать кривые изменения тока и напряжения и построить векторную диаграмму.

5.14. Мгновенное значение тока, проходящего по цепи с активным сопротивлением, $i=2{,}7\sin(\omega t+\pi/3)$ А, при этом напряжение изменяется по закону $u=50\sin(\omega t+\pi/3)$ В. Определить сопротивление и потребляемую мощность цепи, а также действующие значения тока и напряжения.

5.15*. В цепь переменного тока последовательно включены два резистора. Ток изменяется по закону $i=0{,}2\sin(628t-\pi/4)$ А. Потребляемая ими мощность $P=2{,}7$ Вт, причем на первом резисторе она составляет $^2/_3$ всей мощности. Определить сопротивления резисторов, записать закон изменения напряжения на каждом из них. Построить векторную диаграмму для момента времени $t=0$ и определить период сигнала.

5.16*. Два параллельно соединенных резистора сопротивлениями $R1=100$ Ом и $R2=20$ Ом подключены к источнику переменного тока. Ток в неразветвленной части цепи $i=3{,}4\sin(\omega t-\pi/4)$ А. Определить действующие значения всех токов и входного напряжения, полную потребляемую мощность. Записать выражения для мгновенных значений токов в параллельных ветвях.

5.17. Действующее значение падения напряжения U_1 на сопротивлении $R1$ (рис. 5.12) при прохождении

по нему тока $i_1=8{,}6\sin(\omega t+\pi/8)$ А составляет 49 В при $U_{вх}=93$ В. Отношение сопротивлений $R3/R2=4$. Определить сопротивление каждого резистора, эквивалентное сопротивление всей цепи R, полную потребляемую мощность. Записать выражения для мгновенных значений всех токов и напряжений.

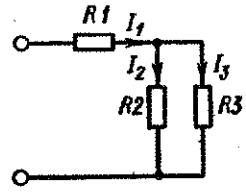

Рис. 5.12

5.18. В электрической цепи схемы рис. 5.12 с входным напряжением $U_{вх}=110$ В по резистору $R2$ проходит ток $I_2=800$ мА. Сопротивление параллельного участка цепи $R3=140$ Ом. Известно, что $I_2=0{,}8I_1$ и его начальная фаза $\Psi_2=-\pi/3$. Определить действующие и амплитудные значения всех токов, мощность на каждом участке цепи, полную потребляемую мощность. Записать выражения для мгновенных значений напряжения и тока u_1 и i_1 и построить векторную диаграмму.

5.19*. Полная мощность, потребляемая нагрузкой, соединенной по схеме рис. 5.12, $S=0{,}4$ кВт при напряжении $U_{вх}=200$ В. Мощность, потребляемая на параллельном участке, $P=0{,}16$ кВт, причем $^2/_5$ этой мощности выделяется на резисторе $R3$. Определить действующие значения токов и напряжений на всех участках цепи и сопротивления этих участков.

5.20*. Сопротивления резисторов в схеме рис. 5.12. $R1=720$ Ом, $R2=800$ Ом, $R3=1200$ Ом. Входное напряжение $u_{вх}=73\sin(\omega t+\pi/4)$ В. Определить действующие значения токов в ветвях и записать выражения их мгновенных значений. Построить векторную диаграмму токов и напряжений для момента времени $t=0$. Определить также полную потребляемую мощность цепи.

5.21. К катушке индуктивности приложено напряжение переменного тока частотой $f=100$ Гц и действующим значением $U=50$ В при максимальном значении тока $I_m=2{,}5$ А. Определить индуктивность катушки (активным сопротивлением катушки пренебречь).

5.22. К катушке с индуктивностью $L=0{,}2$ Гн приложено напряжение $U=36$ В. Определить действующее значение тока в катушке и записать закон его изменения, если частота сигнала $f=150$ Гц и начальная фаза напряжения $\Psi_u=0$.

5.23. Через катушку индуктивности сопротивлением $x_L = 1{,}2$ Ом проходит переменный ток частотой $f = 800$ Гц и амплитудным значением $I_m = 450$ мА. Определить индуктивность катушки, действующее значение напряжения на ней, а также полную потребляемую мощность. Записать выражение для мгновенного значения напряжения на катушке.

5.24*. Через катушку индуктивностью $L = 150$ мГн проходит ток $i = 0{,}1 \sin 500\pi t$ А. Записать выражение для мгновенного значения ЭДС самоиндукции, определить ее амплитудное значение и построить векторную диаграмму.

5.25. Действующие значения переменного напряжения и тока с частотой $f = 25$ Гц в катушке индуктивности $U = 36{,}5$ В и $I = 1{,}25$ А соответственно. Определить индуктивность катушки, записать выражения для мгновенных значений напряжения и тока, построить графики изменения этих значений во времени.

5.26*. К катушке индуктивности приложено напряжение $u = 0{,}3 \sin 314t$ В. В момент времени $t = T/2$ мгновенное значение тока $i = 0{,}5$ А. Записать выражение для мгновенного значения тока, построить графики изменения этих величин во времени, определить значение индуктивности и реактивную мощность.

5.27. К катушке индуктивности (с малым активным сопротивлением) сопротивлением $X_L = 94$ Ом приложено действующее значение напряжения $U = 127$ В с частотой $f = 150$ Гц. Начальная фаза тока $\Psi_i = -\pi/6$. Записать выражение мгновенного значения напряжения и тока, построить эти зависимости в функции времени, определить реактивную мощность и построить векторную диаграмму для момента времени $t = 0$.

5.28. Напряжение, изменяющееся по закону $u = 113{,}5 \sin(126t + \pi/2)$ В, приложено к катушке с индуктивностью $L = 0{,}5$ Гн (активным сопротивлением катушки пренебречь). Определить действующее значение тока в катушке, период, полную потребляемую мощность. Записать выражение для мгновенного значения тока и построить графики изменения u и i за период.

5.29. По катушке, индуктивность которой $L = 0{,}02$ Гн, проходит ток, изменяющийся по закону $i = 0{,}03 \sin 1570t$ А. Определить действующие значения напряжения, приложенного к катушке, наведенной

ЭДС, полную потребляемую мощность. Построить векторную диаграмму и записать закон изменения u и e_L во времени.

5.30. Через катушку индуктивности проходит ток $i = 1{,}5 \sin 1256t$ А. Определить индуктивность катушки, ее сопротивление, реактивную мощность и максимальное значение ЭДС самоиндукции, если в момент времени $t = {}^2/_3\, T$ значение наведенной ЭДС $e = 28$ В.

5.31*. Две катушки с индуктивностями $L_1 = 150$ мкГн и $L_2 = 350$ мкГн, соединенные параллельно, включены в цепь переменного тока. В неразветвленной части цепи ток изменяется по закону $i = 6{,}1 \sin 3140t$ А. Определить амплитудное и действующее значения падения напряжения на зажимах катушек, записать закон изменения ЭДС самоиндукции и определить реактивную мощность каждой катушки.

5.32. По двум катушкам L_1 и L_2, соединенным последовательно, проходит ток $i = 3{,}5 \sin 251{,}2t$ А. Действующее значение напряжения на входе этой цепи $U = 140$ В. Определить индуктивность катушек, их сопротивление и максимальные значения ЭДС, наведенной в каждой катушке, если $U_1 = 0{,}75 U_2$.

5.33. Амплитудное значение ЭДС, наведенной в катушке с индуктивностью $L = 54{,}1$ мГн, при прохождении по ней тока с амплитудным значением $I_m = 1{,}8$ А составляет 61,2 В. Определить наибольшее значение магнитного потока в катушке и частоту переменного тока, если катушка имеет 85 витков (активным сопротивлением катушки пренебречь).

5.34*. При действующем значении напряжения $U = 120$ В с частотой $f = 350$ Гц, приложенного к катушке, максимальный магнитный поток $\Phi_m = 2{,}8 \cdot 10^{-3}$ Вб. Катушка имеет индуктивность $L = 26$ мГн. Определить число витков катушки и действующее значение тока в ней. Как изменится число витков и ток: а) при увеличении частоты в три раза; б) при уменьшении частоты в два раза; в) при уменьшении входного напряжения в два раза?

5.35. По катушке с индуктивностью $L = 0{,}09$ Гн (активным сопротивлением катушки пренебречь) проходит ток, действующее значение которого $I = 0{,}8$ А при частоте $f = 1500$ Гц. Определить амплитудное значение приложенного к катушке напряжения,

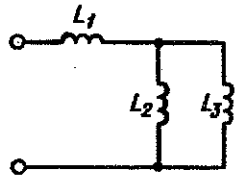

Рис. 5.13

максимальную магнитную индукцию и потребляемую мощность, если катушка имеет 130 витков и площадь поперечного сечения $S=12$ см^2. Записать выражение для мгновенного значения напряжения на катушке, если $\Psi_i=25°$. Построить векторную диаграмму для $t=0$.

5.36*. На рис. 5.13 представлена схема соединения индуктивных катушек, подключенных к источнику переменного тока. Реактивная мощность $Q=120$ вар, причем половина всей мощности выделяется на катушке L_1 при токе $i_1=1{,}7\sin(\omega t-\pi)$ А. Действующее значение тока I, проходящего по катушке L_2, составляет 0,64 А. Определить индуктивность каждой катушки, действующее значение входного напряжения и записать выражения для мгновенных значений токов i_2 и i_3, если $T=0{,}04$ С.

5.37*. Напряжение на входе электрической цепи (см. рис. 5.13) $u=250\sin(1256t+\pi/3)$ В, действующее значение тока в неразветвленной части цепи $I=0{,}31$ А. На катушке L_3, сопротивление которой в 1,5 раза меньше сопротивления второй катушки L_2, мощность $Q_3=18$ вар. Определить индуктивность каждой катушки и всей цепи, действующие значения напряжений и токов на всех участках и записать закон изменения этих величин во времени. Построить векторную диаграмму токов и напряжений для момента времени $t=0$.

5.38. К катушке, индуктивность которой $L=0{,}01$ Гн и сопротивление $R=15$ Ом, приложено синусоидальное напряжение частотой $f=300$ Гц и действующим значением $U=82$ В. Определить действующее значение тока в цепи и записать закон его изменения во времени, если начальная фаза напряжения $\Psi_u=0$.

5.39. По катушке с индуктивностью $L=200$ мГн и сопротивлением $R=85$ Ом проходит переменный ток $i=1{,}7\sin 628t$ А. Определить амплитудное, действующее значения и записать выражение мгновенного значения напряжения на катушке.

5.40. Мгновенные значения тока и напряжения на катушке индуктивности $i=0{,}1\sin 942t$ А и $u=27\sin(942t+\pi/3)$ В. Определить активное сопротивление катушки, ее индуктивность и значения напряжений U_R и U_L. Построить векторную диаграмму.

5.41. Полное сопротивление катушки $Z=8$ Ом, ее индуктивность $L=300$ мкГн. Действующее значение падения напряжения на ней составляет 4,8 В при частоте $f=2500$ Гц. Определить угол сдвига фаз между напряжением и током, построить векторную диаграмму и определить полную, активную и реактивную мощности.

Определить указанные величины и построить векторные диаграммы для всех вариантов, указанных в табл. 5.1.

5.42. Амплитудное значение напряжения, приложенного к катушке, $U_m=52$ В, ее активное сопротивление $R=63$ Ом. Фазовый сдвиг между напряжением и током $\varphi=40°$. Определить индуктивность катушки, падение напряжения на ее активном и индуктивном сопротивлениях и построить векторную диаграмму для $t=0$ при условии, что начальная фаза напряжения $\Psi_u=30°$, частота $f=100$ Гц.

Таблица 5.1

Варианты	$U_{вх}$, В	Z, Ом	L, Гн	f, Гц
1	36	120	$0{,}3\cdot$	50
2	8	2,5	$2\cdot10^{-4}$	1000
3	100	40	0,4	20
4	52	80	0,06	150
5	16	120	0,5	400
6	120	240	2	10

5.43. Индуктивное и активное сопротивления катушки составляют соответственно 12 и 5 Ом. Действующее значение приложенного к ней напряжения $U=110$ В. Построить векторную диаграмму и треугольник мощностей.

5.44. Действующее значение переменного тока с частотой $f=450$ Гц, проходящего по катушке, $I=1{,}2$ А. Активное сопротивление катушки $R=20$ Ом. Определить индуктивность катушки, полную, активную и реактивную мощности, если падение напряжения на индуктивном сопротивлении катушки в пять раз больше напряжения на ее активном сопротивлении. Построить векторную диаграмму и треугольник мощностей.

5.45. Действующие значения напряжений на активном и индуктивном сопротивлениях катушки равны соответственно 90 и 120 В, ее активная мощность $P=13{,}5$ Вт. Определить ее полную

и реактивную мощности, фазовый сдвиг между напряжением и током. Построить треугольники сопротивлений и мощностей.

5.46*. Мгновенное значение тока, проходящего по катушке, $i=2{,}4\sin 314t$ А, действующее значение напряжения $U=54{,}4$ В, при этом реактивная мощность катушки $Q=48$ вар. Определить полное, активное и реактивное сопротивления катушки, активную и полную мощности, построить треугольник сопротивлений. Записать выражения для мгновенных значений напряжения на катушке, ее активном и индуктивном сопротивлении.

5.47. Для катушки с активным сопротивлением $R=2{,}4$ Ом и индуктивностью $L=500$ мкГн известны значения полной и активной мощности: $S=73$ В·А и $P=48{,}6$ Вт. Определить реактивную мощность катушки, частоту переменного тока и угол сдвига фаз между напряжением и током. Построить векторную диаграмму.

5.48. Активная и реактивная мощности катушки с активным сопротивлением $R=150$ Ом составляют 13,5 Вт и 22,5 вар. Определить индуктивное и полное сопротивления катушки, полную потребляемую мощность, построить треугольники сопротивлений и мощностей. Записать выражения мгновенных значений тока и напряжения в катушке, если $\Psi_i=0$. Определить указанные величины для вариантов, указанных в табл. 5.2.

Таблица 5.2.

Варианты	P, Вт	Q, вар	R, Ом	Ψ_i	Ψ_u
1	60	40	7,5	$-\pi/6$	—
2	30	40	100	—	$\pi/2$
3	100	100	2,5	—	$\pi/3$
4	5	16	0,4	$-\pi/4$	—
5	80	20	16	$-\pi$	—
6	20	10	50	—	$\pi/9$

5.49. Действующее значение падения напряжения на катушке $U=36$ В при частоте $f=200$ Гц. Падение напряжения на индуктивном сопротивлении $U_L=10$ В, активная мощность $P=5$ Вт. Определить полное, активное, индуктивное сопротивления катушки, ее индуктивность, полную и реактивную мощность, коэффициент мощности, построить векторную диаграмму.

5.50. Напряжение, приложенное к катушке индуктивности, $u=210\sin(5024t-30°)$ В, ток $i=12\sin(5024t-5°)$ А. Определить полное, активное

и реактивное сопротивления катушки, ее индуктивность, построить треугольник сопротивлений и векторную диаграмму для момента $t=0$.

5.51. Мгновенное значение напряжения на катушке $u=12\sin(2512t-80°)$ В. Отношение $X_L/R_к=2{,}3$, полная потребляемая мощность $S=100$ В·А. Определить полное, активное, реактивное сопротивления катушки, ее индуктивность, активную и реактивную мощности. Записать выражения для мгновенных значений тока и наведенной ЭДС. Построить векторную диаграмму для момента времени $t=0$.

5.52*. К катушке с индуктивностью $L=50$ мГн приложено напряжение переменного тока с частотой $f=300$ Гц, сдвинутое по фазе относительно тока на угол $\varphi=60°$. Полная мощность цепи $S=64{,}5$ В.А. Определить полное, активное и реактивное сопротивления катушки, коэффициент мощности. Записать выражения мгновенных значений тока и напряжения, если $\Psi_i=-\pi/3$. Построить треугольник мощностей и векторную диаграмму для момента времени $t=0$.

5.53. Переменный ток $i=5\sin(251{,}2t+30°)$ А проходит по катушке с активным сопротивлением $R=0{,}8$ Ом и индуктивностью $L=6{,}3\cdot10^{-3}$ Гн. Определить полную активную и реактивную мощности, коэффициент мощности. Записать выражения мгновенных значений напряжения на катушке и наведенной ЭДС. Построить векторную диаграмму для момента времени $t=0$.

5.54*. Действующие значения тока и напряжения в катушке с индуктивностью $L=500$ мкГн составляют 120 мА и 2 В. Определить полное, активное и реактивное сопротивления катушки и частоту сигнала, если коэффициент мощности цепи $\cos\varphi=0{,}64$ и действующее значение наведенной ЭДС $E=1{,}5$ В. Построить треугольник сопротивлений, мощностей и векторную диаграмму для момента времени $t=0$. Записать выражения для мгновенных значений тока, напряжения и наведенной ЭДС, если $\Psi_u=-20°$.

5.55. К катушке с индуктивностью $L=0{,}006$ Гн приложено напряжение $u=140\sin(4082t+15°)$ В, при этом амплитудное значение напряжения на индуктивном сопротивлении $U_{Lm}=90$ В. Определить полное и активное сопротивления катушки, коэффициент мощности. Записать выражение мгновенного значения тока. Построить треугольник мощностей и векторную диаграмму для момента времени $t=0$.

5.56. При прохождении по катушке с индуктивным сопротивлением $X_L = 1335$ Ом тока $I_m = 0{,}2$ А на ней возникает ЭДС самоиндукции с амплитудным значением $E_m = 267$ В. Определить полное и активное сопротивления катушки, полную, активную и реактивную мощности, если $\cos\varphi = 0{,}7$, а $f = 850$ Гц. Построить векторную диаграмму для момента времени $t = 0$, если начальная фаза $\Psi_u = -60°$.

5.57. По катушке индуктивности проходит переменный ток с действующим значением $I = 18$ А, с частотой $f = 40$ Гц, при этом $S = 546$ В·А, а $Q = 285$ вар. Определить параметры катушки ($R_к$, X_L, L, $Z_к$), коэффициент мощности, построить треугольники сопротивлений и мощностей.

5.58*. Катушка индуктивности включена последовательно с резистором сопротивлением $R = 100$ Ом. Частота переменного тока, проходящего по цепи, $f = 50$ Гц. Действующие значения падения напряжения на резисторе и катушке $U_R = 10$ В и $U_к = 4$ В. Активная мощность цепи $P = 1{,}2$ Вт. Определить активное сопротивление катушки, ее индуктивность, коэффициент мощности. Построить треугольник напряжений.

5.59. Активная мощность катушки с индуктивностью $L = 6{,}25$ мГн, подключенной к источнику переменного тока с частотой $f = 250$ Гц, равна 600 Вт. Действующее значение активной составляющей напряжения $U = 66{,}6$ В. Определить действующие значения тока и напряжения, приложенного к катушке, полное, активное и реактивное сопротивления катушки, полную и реактивную мощности. Записать выражения для мгновенных значений тока и напряжения в катушке, если $\Psi_u = \pi/4$. Построить векторную диаграмму для момента времени $t = 0$.

5.60. К источнику переменного тока с частотой $f = 25$ Гц подключена индуктивная катушка. Действующее значение тока через катушку $I = 7$ А, активная мощность $P = 166{,}6$ Вт, падение напряжения на индуктивном сопротивлении катушки $U_L = 54$ В. Определить полное и активное сопротивления катушки, ее индуктивность, действующее значение приложенного напряжения, построить треугольник мощностей и векторную диаграмму.

5.61. Реактивная и полная мощности, потребляемые индуктивной нагрузкой, $Q = 103{,}5$ вар

и $S = 108{,}5$ В·А. Определить действующие значения тока и приложенного к входу напряжения, коэффициент мощности и потребляемую активную мощность, если $U_L = 57{,}6$ В. Построить векторную диаграмму.

5.62*. Для определения параметров катушки ее подключили к источнику постоянного тока напряжением $U = 36$ В, при этом ток был равен 14,4 А. Затем катушку подключили к источнику переменного тока с частотой $f = 600$ Гц и действующим значением напряжения $U = 60$ В. При этом действующее значение тока достигло 8,7 А. Определить полное, активное и реактивное сопротивления катушки и ее индуктивность.

5.63*. Катушку с индуктивностью $L = 242$ мГн подключают к источнику постоянного тока с напряжением $U = 120$ В, при этом ток $I = 480$ мА. Затем катушку подключают к источнику переменного тока с действующими значениями входного напряжения и тока $U = 120$ В и $I = 150$ мА. Определить полное и активное сопротивления катушки, полную, активную и реактивную мощности и частоту источника переменного тока. Построить векторную диаграмму.

5.64*. Две катушки соединены последовательно и подключены к источнику постоянного тока напряжением $U = 27$ В, при этом ток в цепи $I = 135$ мА. Затем цепь подключают к источнику переменного тока с частотой $f = 150$ Гц и действующими значениями напряжения и тока $U = 220$ В и $I = 496$ мА. Определить индуктивность и активное сопротивление второй катушки, если $L_1 = 0{,}3$ Гн и $R_1 = 160$ Ом. Построить векторную диаграмму.

5.65. Потребитель, состоящий из последовательно включенных катушки и резистора 25 Ом, подключен к источнику постоянного тока напряжением 27 В. При этом ток в цепи $I = 0{,}7$ А. Затем тот же потребитель подключают к источнику переменного тока с действующим значением напряжения $U = 127$ В, в этом случае ток $I = 2$ А. Определить полное, активное и реактивное сопротивления катушки, полное сопротивление цепи, фазовый сдвиг между напряжением и током в катушке. Построить треугольник сопротивлений и треугольник мощностей.

5.66. Катушка с активным сопротивлением $R = 2{,}8$ Ом и индуктивностью $L = 0{,}0125$ Гн подсоединена к источнику переменного тока с периодом

$T=0{,}02$ с, при этом амплитудное значение тока в катушке $I_m=4{,}5$ А. Определить ток в катушке, если ее подключить к источнику постоянного тока того же напряжения. Определить полную, активную и реактивную мощности катушки, построить треугольник сопротивлений. Определить также мощность, потребляемую катушкой от источника постоянного тока.

5.67*. К источнику переменного тока поочередно подключают две катушки индуктивности. Для одной катушки полная и активная мощности $S=1000$ В·А и $P=320$ Вт, действующее значение тока $I=4$ А. Для второй катушки $S=250$ В·А, $P=150$ Вт и $I=1$ А. Эти катушки соединили последовательно и подключили к тому же источнику. Определить действующее значение приложенного напряжения и тока в цепи, полную, активную и реактивную мощности, построить треугольник сопротивлений. Для каждой из трех указанных цепей определить фазовый сдвиг между соответствующим значением напряжения и тока и коэффициенты мощности.

5.68. К источнику переменного тока с действующим значением выходного напряжения $U=36$ В и изменяющейся частотой подключена катушка с индуктивностью $L=46$ мГн и активным сопротивлением $R=24$ Ом. Определить действующее и амплитудное значения тока в катушке, полную, активную и реактивную мощности при следующих значениях частот: $f=0$; 50; 100; 200; 500 Гц. Построить графики I, S, P и Q при изменении частоты в указанном диапазоне.

5.69. Активная мощность, потребляемая индуктивной катушкой от источника переменного тока с действующим значением напряжения $U=240$ В и периодом $T=2{,}5\cdot10^{-3}$ с, постоянна и равна 1,2 кВт. Определить значения полной и реактивной мощностей и действующее значение тока катушки для изменяющегося коэффициента мощности $\cos\varphi=0{,}1$; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 1,0. Построить зависимости этих величин от $\cos\varphi$.

5.70. К катушке с индуктивностью $L=10$ мГн и сопротивлением $R=4{,}7$ Ом приложено напряжение $U=25$ В при частоте $f=150$ Гц. Определить ток I катушки и максимальный поток в ней, если катушка имеет 40 витков.

5.71. По катушке, имеющей 47 витков с активным сопротивлением $R=15$ Ом и индуктивным $X_L=55$ Ом, проходит переменный ток $I=0{,}76$ А. Определить действующее значение приложенного напряжения, частоту и индуктивность катушки, если максимальный магнитный поток $\Phi_m=0{,}28\cdot10^{-3}$ Вб. Записать выражения мгновенных значений тока и входного напряжения, если $\Psi_i=0$. Построить векторную диаграмму тока, напряжения и потока для $t=0$.

5.72. Дан треугольник напряжений ABC, где AC — входное напряжение, AB и BC — соответственно активная и реактивная составляющие напряжения катушки. Найти геометрическое место точек B при изменении отношения R/X от 0 до ∞ при постоянстве входного напряжения.

5.73. Мгновенные значения токов и напряжений в нагрузке заданы следующими выражениями:

1) $i=2{,}5\sin(628t+30°)$ А, $u=90\sin 628t$ В;
2) $i=2{,}5\sin(942t-30°)$ А, $u=30\sin(942t+60°)$ В;
3) $i=0{,}5\sin(3140t-90°)$ А, $u=128\sin 3140t$ В;
4) $i=1{,}2\sin(157t+40°)$ А, $u=28{,}8\sin(157t-50°)$ В;
5) $i=0{,}2\sin(376{,}8t+80°)$ А, $u=250\sin(376{,}8t+170°)$ В;
6) $i=0{,}06\sin(11304t-45°)$ А, $u=120\sin(11304t-45°)$ В.

Определить частоту и период сигнала, тип нагрузки (активная, индуктивная, емкостная), полное, активное, реактивное сопротивления, полную, активную и реактивную мощности, сдвиг по фазе между напряжением и током. Построить треугольники сопротивлений и мощностей.

5.74. Конденсатор подключен к источнику переменного тока с частотой $f=50$ Гц и амплитудным значением напряжения $U_m=150$ В. Действующее значение тока в конденсаторе $I=2{,}5$ А. Определить емкость конденсатора.

5.75. Через конденсатор емкостью $C=0{,}1$ мкФ проходит ток, действующее значение которого $I=50$ мА. Частота источника $f=500$ Гц. Определить действующее и амплитудное значения напряжения на конденсаторе и его сопротивление. Построить векторную диаграмму.

5.76. К конденсатору емкостью $C=15$ мкФ приложено напряжение переменного тока с частотой $f=200$ Гц и действующим значением $U=36$ В.

Определить сопротивление конденсатора и действующее значение тока. Записать выражение для мгновенного значения тока; если $\Psi_u = 0$.

5.77. Действующее значение тока I через конденсатор емкостью $C = 7200$ пФ составляет 150 мА. При этом амплитудное значение напряжения $U_m = 120$ В. Определить период переменного тока.

5.78. Мгновенное значение напряжения на конденсаторе $u = 180 \sin 628t$ В, действующее значение тока $I = 1{,}1$ А. Определить емкость конденсатора, записать выражение для мгновенного значения тока и зарисовать кривые тока и напряжения для одного периода.

5.79. Мгновенное значение напряжения на конденсаторе емкостью $C = 2{,}5$ мкФ составляет $u = 24 \sin (1884t + 15°)$ В. Определить действующее значение тока в конденсаторе и записать закон его изменения.

5.80. Действующее значение напряжения, приложенного к конденсатору, $U = 60$ В, мгновенное значение тока $i = 3{,}4 \sin (3140t + 40°)$ А. Определить сопротивление и емкость конденсатора и записать выражение для мгновенного значения напряжения. Построить векторную диаграмму для $t = 0$.

5.81*. Через конденсатор сопротивлением $X_C = 108$ Ом проходит ток $i = 6{,}4 \sin (6280t - 10°)$ А. Определить емкость конденсатора, действующее значение напряжения, реактивную мощность. Записать выражение для мгновенного значения напряжения на конденсаторе. Изобразить кривые изменения тока, напряжения, мощности.

5.82. Мгновенные значения тока и напряжения в конденсаторе $i = 0{,}72 \sin (2198t + 50°)$ А и $u = 340 \sin (2198t - 40°)$ В. Определить емкость и сопротивление конденсатора, полную потребляемую мощность и период сигнала.

5.83. Два последовательно соединенных конденсатора емкостями $C1 = 2$ мкФ и $C2 = 1$ мкФ подключены к источнику с частотой $f = 100$ Гц и действующим значением напряжения $U = 105$ В. Определить действующие значения тока в цепи и напряжений на каждом из конденсаторов.

5.84*. К источнику переменного тока с частотой $f = 1400$ Гц и амплитудным значением напряжения $U_m = 12$ В подключены два последовательно соединенных конденсатора $C1$ и $C2$. Действующее значение

тока $I = 520$ мА. Определить значения емкостей $C1$ и $C2$, действующие значения напряжения на каждом из них, реактивную мощность, если $C1/C2 = 3$.

5.85. К двум последовательно включенным конденсаторам $C1$ и $C2$ подведено переменное напряжение с действующим значением $U = 300$ В. Определить емкость конденсатора $C1$, если емкость $C2 = 1{,}5$ мкФ. Действующее значение напряжения на конденсаторе $C1$ и ток в цепи соответственно равны 144 В и 1,25 А. Определить реактивную мощность.

5.86. Два конденсатора соединены последовательно и подключены к источнику переменного тока с частотой $f = 2600$ Гц. Полное сопротивление цепи $Z = 82{,}2$ Ом, амплитудное значение падения напряжения на каждом из конденсаторов $U_m = 35$ и 59 В. Определить емкость каждого конденсатора, емкость всей цепи, действующее значение тока и реактивную мощность. Записать выражения мгновенного значения тока и напряжения цепи, если $\Psi_i = \pi/6$. Построить графики изменения тока, напряжения и мощности за период.

5.87. Два конденсатора $C1$ и $C2$ соединены параллельно и подключены к источнику переменного тока с частотой $f = 50$ Гц и действующим значением напряжения $U = 106$ В. В неразветвленной части цепи $I = 0{,}15$ А. Определить действующие значения токов в ветвях и емкость каждого конденсатора, если $C2 = 2C1$, а также реактивную мощность каждого конденсатора и всей цепи.

5.88. Два конденсатора емкостями $C1 = 10$ мкФ и $C2 = 24$ мкФ соединены параллельно и подключены к источнику переменного тока с частотой $f = 150$ Гц. Амплитудное значение тока I_m через конденсатор $C1$ равно 1,8 А. Определить действующие значения приложенного напряжения, тока в неразветвленной цепи, тока через конденсатор $C2$ и полную потребляемую мощность. Построить векторную диаграмму.

5.89. Полное сопротивление цепи, состоящей из двух параллельно соединенных конденсаторов, $Z = 114$ Ом. Мгновенное значение тока в неразветвленной части цепи $i = 1{,}2 \sin (2198t + 30°)$ А, емкость $C1 = 2{,}5$ мкФ. Определить действующие значения входного напряжения и токов в ветвях, полную потребляемую мощность. Записать выражение мгновенного значения напряжения.

5.90. Для параллельно соединенных конденсаторов $C1$ и $C2$ известны мгновенные значения напряжения на их зажимах и тока в неразветвленной части цепи: $u=480\sin(7222t-25°)$ В и $i=2{,}1\sin(7222t+65°)$ А. Действующее значение тока в конденсаторе с бо́льшей емкостью составляет 80% действующего значения тока в неразветвленной части цепи. Определить емкость кондеисаторов и полную потребляемую мощность. Построить векторную диаграмму токов и напряжений для $t=0$.

5.91*. Два конденсатора $C1$ и $C2$, соединенные параллельно между собой, последовательно включены с конденсатором $C3$, общая емкость всей цепи $C=1{,}5$ мкФ. Действующее значение напряжения на зажимах конденсаторов $C1$ и $C2$ и реактивная мощность на этом участке равны соответственно 28,5 В и 6 вар. Определить емкость каждого конденсатора и действующее значение входного напряжения, если через конденсатор $C1$ проходит ток $i=0{,}1\sin(2512t+20°)$ А. Записать выражения мгновенных значений токов во всех ветвях и напряжения на входе. Построить графики изменения тока в неразветвленной части цепи и входного напряжения за период.

5.92*. Конденсатор $C1$ емкостью 0,72 мкФ соединен последовательно с конденсаторами $C2$ и $C3$, соединенными между собой параллельно. Напряжение на входе всей цепи $u=164\sin(9420t-60°)$ В, амплитудное значение тока I_m в ветви с $C1$ составляет 0,75 А. Реактивная мощность конденсатора $C2$ равна 16,2 вар. Определить емкости конденсаторов $C2$ и $C3$, действующие значения токов, проходящих через них, полную потребляемую цепью мощность. Записать выражения для i_1, i_2, i_3 и построить векторную диаграмму для момента времени $t=0$.

5.93. Конденсатор и последовательно включенный с ним резистор подключены к источнику переменного тока с частотой $f=250$ Гц. Действующие значения тока и напряжения равны соответственно 800 мА и 36 В. Реактивная мощность цепи $Q=18{,}5$ вар. Определить сопротивление резистора, емкость конденсатора, полную и активную мощности цепи. Построить векторную диаграмму.

5.94. Действующее значение тока, проходящего через конденсатор и последовательно соединенный с ним резистор, $I=4{,}5$ А. Полное сопротивление цепи $Z=3$ Ом. Определить сопротивление резистора, емкость конденсатора, полную, активную и реактивную мощности, действующее значение напряжения на входе цепи, если $U_R=5$ В, а частота источника $f=1500$ Гц. Построить треугольник мощностей и векторную диаграмму.

5.95. К потребителю, состоящему из последовательно соединенных резистора и конденсатора, подведено переменное напряжение с действующим значением $U=500$ В. Активная мощность потребителя $P=320$ Вт, $\cos\varphi=0{,}75$. Определить ток в цепи, полную и реактивную мощности, полное, активное и реактивное сопротивления потребителя. Построить векторную диаграмму. Указанные параметры цепи определить для всех вариантов в соответствии с табл. 5.3.

Таблица 5.3

Варианты	U, В	P, Вт	$\cos\varphi$
1	50	100	0,6
2	120	240	0,9
3	200	400	0,4
4	27	80	0,7
5	350	600	0,2
6	220	180	0,5

5.96*. Резистор и конденсатор соединены последовательно и подключены к источнику переменного тока с периодом $T=0{,}01$ с. Действующие значения падения напряжения на резисторе и конденсаторе равны 12 и 35 В, при этом $Q=-42$ вар. Определить действующие значения тока и напряжения в цепи, полную и активную мощности, полное, активное, реактивное сопротивления, емкость конденсатора. Построить векторную диаграмму токов и напряжений.

5.97. Мгновенные значения напряжения и тока в цепи, состоящей из конденсатора и последовательно включенного резистора, $u=420\sin 314t$ В и $i=7\sin(314t+63°)$ А. Определить полное и реактивное сопротивления цепи, сопротивление резистора, полную потребляемую мощность, действующие значения напряжений на резисторе и конденсаторе. Построить кривые изменения тока, входного напряжения и полной мощности.

5.98*. Ток $i=17\sin(1256t-15°)$ А проходит через конденсатор и последовательно включенный с ним резистор. Фазовый сдвиг между напряжением на входе и током $\varphi=-35°$, потребляемая активная мощность цепи $P=504$ Вт. Определить действующие

значения тока и напряжения в цепи, сопротивление резистора, емкость конденсатора, полную и реактивную мощности цепи. Записать закон изменения входного напряжения, напряжений на конденсаторе и резисторе. Построить векторную диаграмму для момента времени $t=0$.

5.99. Напряжение $u=154\sin(157t+30°)$ В приложено на входе приемника, состоящего из последовательно включенных резистора и конденсатора; при этом амплитудное значение тока $I_m=2{,}8$ А. Определить сопротивление резистора, полное сопротивление приемника, емкость конденсатора, полную, активную и реактивную мощности, если $U_C=90$ В; записать выражения мгновенных значений тока и напряжения на конденсаторе. Построить кривые тока и входного напряжения за период и векторную диаграмму для момента времени $t=0$.

5.100. Последовательно соединенные резистор и конденсатор подключены к источнику переменного тока, и в цепи установился ток $i=0{,}4\sin 8792t$ А, при этом $u_R=180\sin 8792t$ В. Определить действующее значение входного напряжения, полное сопротивление цепи, сопротивление резистора, полную, активную и реактивную мощности при условии, что $C=0{,}18$ мкФ, $\Psi_u=0$. Записать выражения для мгновенных значений входного напряжения и напряжения на конденсаторе. Построить векторную диаграмму для момента времени $t=0$.

5.101*. Падения напряжений на конденсаторе и резисторе, соединенных последовательно, $u_C=4{,}4\sin(50240t-60°)$ В, $u_R=11\sin(50240t+30°)$ В. Действующее значение тока в цепи $I=550$ мА. Определить емкость конденсатора, сопротивление резистора, полную, активную и реактивную мощности, действующее значение входного напряжения и коэффициент мощности. Записать выражения мгновенного значения тока и напряжения в цепи. Построить векторную диаграмму для момента времени $t=0$.

5.102*. К источнику переменного тока с частотой $f=400$ Гц подключена цепь, состоящая из резистора и параллельно включенного конденсатора емкостью $C=1{,}65$ мкФ. Действующие значения потребляемого цепью тока $I=1{,}1$ А и тока в ветви с конденсатором $I=0{,}72$ А. Определить действующие значения входного напряжения и тока в резисторе, его сопротивление, потребляемую полную, активную и реактивную мощности, коэффициент мощности. Построить векторную диаграмму.

5.103. К электрической цепи из последовательно соединенных резистора сопротивлением $R=6{,}5$ Ом, катушки с индуктивностью $L=20$ мГн и конденсатора емкостью $C=30$ мкФ подведено напряжение переменного тока с частотой $f=150$ Гц и действующим значением напряжения $U=30$ В. Определить полное сопротивление цепи, действующее значение тока, полную потребляемую мощность, коэффициент мощности. Построить треугольник сопротивлений.

5.104. Катушка с активным сопротивлением $R=10$ Ом и индуктивностью $L=0{,}06$ Гн соединена последовательно с конденсатором емкостью $C=72$ мкФ и подключена к источнику переменного тока с частотой $f=50$ Гц и амплитудным значением напряжения $U_m=110$ В. Определить действующее значение тока, полное сопротивление цепи, полную, активную и реактивную мощности. Построить векторную диаграмму токов и напряжений. Определить указанные величины и построить векторные диаграммы для значений, указанных в табл. 5.4.

5.105. Катушка с индуктивным сопротивлением $X_L=140$ Ом и конденсатор с емкостным сопротивлением $X_C=80$ Ом соединены последовательно и подключены к источнику переменного тока с действующим значением напряжения $U=25$ В и частотой $f=1$ кГц. Амплитудное значение тока в цепи $I_m=282$ мА. Определить полное сопротивление потребителя, активное сопротивление катушки, полную, активную и реактивную мощности. Построить треугольник мощностей. Записать выражения мгновенных значений тока и входного напряжения цепи, если $\Psi_i=\pi/2$.

Таблица 5.4

Варианты	R, Ом	L, мГн	C, мкФ	$U_{вх}$, В	f, Гц
1	100	30	60	220	50
2	20	50	25	160	300
3	80	10	4	20	1000
4	50	5	0,4	300	4000
5	10	5	10	30	500
6	2	4	8	5	200

5.106. В электрической цепи, состоящей из последовательно включенных конденсатора $X_C=265$ Ом, катушки с индуктивным сопротивлением $X_L=157$ Ом и активным $R=92$ Ом сопротивлениями, проходит

ток $i=0{,}5\sin(314t-20°)$ А. Определить полное сопротивление цепи, действующее значение входного напряжения, полную потребляемую мощность, коэффициент мощности. Записать выражение для мгновенного значения входного напряжения. Построить векторную диаграмму токов и напряжений для момента времени $t=0$.

5.107. Для последовательно соединенных катушки и конденсатора заданы значения входного напряжения и тока в цепи $u=168\sin(3140t-15°)$ В и $i=0{,}42\sin(3140t-75°)$ А. Активная мощность потребителя $P=18$ Вт. Определить индуктивность катушки, ее активное сопротивление, емкость конденсатора, если $X_L/X_C=3$. Определить полную и реактивную мощности цепи. Построить векторную диаграмму для момента времени $t=0$ и графики изменения тока и напряжения в катушке за период.

5.108. Для последовательно соединенных резистора, индуктивной катушки ($R_к=0$) и конденсатора известны действующие значения трех напряжений из четырех: 1) $U_R=4$ В, $U_L=4$ В, $U_C=1{,}6$ В, $U_{вх}$—? 2) $U_R=3$ В, $U_L=1$ В, $U_{вх}=5$ В, U_C—? 3) $U_R=6$ В, $U_{вх}=8$ В, $U_C=10$ В, U_L—? 4) $U_{вх}=2{,}7$ В, $U_L=14$ В, $U_C=15$ В, U_R—?. Определить для каждого варианта действующее значение четвертого напряжения, коэффициент мощности и фазовый сдвиг между напряжением и током. Для каждого случая построить векторную диаграмму.

5.109. Последовательно соединенные конденсатор и индуктивная катушка подключены к источнику переменного тока с частотой $f=50$ Гц и действующим значением напряжения 220 В. Определить полное сопротивление цепи, индуктивность катушки и ее активное сопротивление, емкость конденсатора, если при действующем значении тока в цепи $I=0{,}26$ А падение напряжения $U_{Rk}=208$ В, а $Q_C=20{,}3$ вар. Построить треугольник мощностей и векторную диаграмму.

5.110*. Полная мощность S, потребляемая нагрузкой, состоящей из последовательно включенных элементов R, L, C, составляет 915 В·А. Действующие значения падений напряжений на этих элементах равны соответственно 150, 180, 470 В при частоте $f=850$ Гц. Определить действующие значения тока и входного напряжения, полное, активное и реактивное сопротивление цепи, емкость и индуктивность

нагрузки, коэффициент мощности. Записать выражения для мгновенного значения тока и напряжения, если $\Psi_i=0$. Построить векторную диаграмму для момента времени $t=0$.

5.111. Полное сопротивление потребителя, состоящего из последовательно соединенных индуктивной катушки и конденсатора, $Z=250$ Ом, активная мощность цепи $P=100$ Вт, коэффициент мощности $\cos\varphi=0{,}342$. Определить полную и реактивную мощности, активное сопротивление катушки и ее индуктивность, емкость конденсатора, если мгновенное значение напряжения на конденсаторе $u_C=40{,}6\sin(9420t-20°)$ В. Записать выражения для мгновенных значений напряжений на индуктивной катушке, входного напряжения и тока потребителя.

5.112*. Ток $i=0{,}51\sin 4082t$ А проходит по последовательно соединенным катушке индуктивности и конденсатору. Активная мощность цепи $P=11{,}7$ Вт. Определить действующее значение входного напряжения, полную и реактивную мощности, активное сопротивление катушки и ее индуктивность, емкость конденсатора, если полное сопротивление катушки $Z_к=150$ Ом, а полное сопротивление всей цепи $Z_ц=210$ Ом. Записать выражения для мгновенных значений тока и напряжения на входе. Построить графики изменения этих значений за период и векторную диаграмму для момента времени $t=0$.

5.113. Катушка с активным сопротивлением $R=16$ Ом и индуктивностью $L=65$ мГн последовательно соединена с конденсатором переменной емкости. Действующее значение напряжения на входе $U=100$ В при частоте $f=100$ Гц. Определить значение емкости конденсатора, необходимое для получения резонанса напряжения, и действующее значение тока в цепи, а также полную, активную и реактивную мощности цепи.

5.114*. По цепи, состоящей из последовательно соединенных резистора сопротивлением $R=80$ Ом, конденсатора емкостью $C=5{,}5$ мкФ и катушки с первоначальной индуктивностью $L=0{,}04$ Гн, проходит ток $i=360\sin 2512t$ мА. Определить индуктивность катушки, необходимую для получения резонанса напряжения в этой цепи при неизменной частоте источника, и действующее значение тока. Построить векторные диаграммы: а) при первоначальном значении L; б) при

значении L, необходимом для резонансного режима цепи.

5.115. Действующее значение напряжения с изменяющейся частотой на входе нагрузки, состоящей из последовательно включенных резистора сопротивлением $R=125$ Ом, катушки с индуктивностью $L=0{,}02$ Гн и конденсатора емкостью $C=0{,}564$ мкФ, составляет 60 В. Определить частоту резонанса, действующие значения тока, падений напряжений на резисторе, индуктивной катушке и конденсаторе. Построить графики зависимостей $I=F(f)$, $U_L=F(f)$, $U_C=F(f)$ и $\varphi=F(f)$ при изменении частоты от 0 до $2f_0$.

5.116*. К цепи, состоящей из последовательно соединенных резистора сопротивлением $R=36$ Ом, катушки с индуктивностью $L=13{,}8$ мГн и конденсатора переменной емкости, приложено действующее напряжение $U=42{,}5$ В. Определить емкость конденсатора, необходимую для получения резонанса в цепи, резонансную частоту, действующие значения тока и падения напряжений на участках цепи U_R, U_L, U_C, если реактивная мощность на катушке индуктивности $Q_{рез}=91$ вар. Определить полную потребляемую мощность цепи в момент резонанса и построить векторную диаграмму. Построить также векторную диаграмму при $f=0{,}5f_0$.

5.117. К входным зажимам нагрузки, состоящей из последовательно соединенных катушки с индуктивностью $L=0{,}1$ Гн, конденсатора емкостью $C=17{,}6$ мкФ и резистора, приложено напряжение с амплитудным значением $U_m=24{,}2$ В. Определить резонансную частоту, действующее значение тока, сопротивление резистора и действующие значения напряжений на катушке и конденсаторе, если полная потребляемая цепью мощность при резонансе $S=73$ Вт. Построить векторную диаграмму.

5.118*. Катушка с активным $R=125$ Ом и реактивным $X_L=500$ Ом сопротивлениями соединена последовательно с конденсатором. При частоте $f=1800$ Гц в цепи наступает режим резонанса напряжений и $I=80$ мА. Определить емкость конденсатора, индуктивность катушки, действующие значения входного напряжения, напряжений на катушке и конденсаторе. Записать выражения для мгновенных значений этих напряжений, если $\Psi_i=\pi/3$. Построить векторную диаграмму для резонанса. Построить

векторную диаграмму и определить угол сдвига по фазе между входным напряжением и током в цепи при $f=3f_0$.

5.119. К источнику переменного тока с действующим значением напряжения $U=50$ В подключены параллельно соединенные катушка с индуктивным сопротивлением $X_L=8$ Ом и резистор сопротивлением $R=40$ Ом. Определить действующие значения токов в обеих ветвях и в неразветвленной части цепи, полную, активную и реактивную проводимости и мощности цепи, коэффициент мощности. Построить векторную диаграмму.

5.120*. По условию предыдущей задачи определить емкость конденсатора, включаемого параллельно этим двум ветвям, для увеличения коэффициента мощности цепи до 0,9 при неизменной активной мощности и частоте сигнала 150 Гц. Определить проводимость каждой ветви и полную проводимость всей цепи.

5.121. Параллельно соединенные резистор сопротивлением $R=24$ Ом, катушка с индуктивностью $L=15{,}9$ мГн и конденсатор емкостью $C=15$ мкФ подключены к источнику с амплитудным значением напряжения $U_m=70$ В и частотой $f=400$ Гц. Определить действующие значения токов во всех ветвях, полную, активную и реактивную мощности всей цепи, коэффициент мощности, активную и реактивную составляющие тока. Построить векторную диаграмму.

5.122*. Полное сопротивление катушки Z с индуктивностью $L=4{,}2$ мГн составляет 100 Ом. Катушка подключена к источнику переменного тока с частотой $f=2500$ Гц и действующим значением напряжения $U=150$ В. Определить емкость конденсатора, включаемого параллельно катушке, для получения в цепи резонанса токов, действующие значения токов во всех ветвях, полную потребляемую при этом мощность, коэффициент мощности. Построить векторную диаграмму.

5.123. Катушка с индуктивностью $L=120$ мГн и конденсатор емкостью $C=25$ мкФ соединены параллельно и подключены к источнику переменного тока с действующим значением напряжения $U=75$ В. Определить резонансную частоту и действующие значения токов во всех ветвях.

5.124*. Конденсатор емкостью $C=0{,}15$ мкФ последовательно соединен с резистором сопротивлением

$R=12$ кОм, и параллельно им включается катушка с малым активным сопротивлением и переменной индуктивностью. На вход этого потребителя подается напряжение переменного тока частотой $f=50$ Гц и действующим значением напряжения $U=500$ В. Определить значение индуктивности, необходимое для получения в цепи резонанса токов, действующие значения токов во всех ветвях. Построить графики изменения токов во всех ветвях, фазового сдвига между входным напряжением и током в неразветвленной части цепи при изменении индуктивности катушки от 0 до двойного резонансного значения. (Выбрать произвольно шесть — восемь точек.)

5.125*. К источнику переменного тока подключен резистор сопротивлением $R1=160$ Ом, соединенный параллельно с катушкой, индуктивность которой $L=0{,}023$ Гн и активное сопротивление $R_к=60$ Ом. Мощность, выделившаяся на резисторе, $P=35$ Вт, действующее значение тока в катушке $I=702{,}5$ мА. Определить емкость конденсатора, который необходимо подключить в цепь для получения резонанса токов, резонансную частоту, действующие значения входного напряжения и тока в неразветвленной части цепи до резонанса и в момент резонанса, а также активную и реактивную составляющие тока, полную, активную и реактивную мощности до резонанса и в момент резонанса. Построить векторные диаграммы для этих двух режимов.

5.126. Для неразветвленной цепи переменного тока, заданной для каждого варианта значениями параметров, указанных в табл. 5.5, определить недостающие параметры (указанные в той же таблице) при работе цепи в режиме резонанса напряжений.

Таблица 5.5

Варианты	R, Ом	L, мГн	C, мкФ	$U_{вх}$, В	$I_{рез}$, А	S, В·А	P, Вт	Q_L, вар	Q_C, вар	f_0, Гц	U_R, В	U_C, В	U_L, В
1	—	10	1,0	—	2,5	500	—	—	—	—	—	—	—
2	5	—	6	4	—	—	—	64	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	0,5	30	—	—	240	100	—	—	—
4	40	120	0,2	—	—	—	360	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	2,2	—	55	—	—	1500	—	450	—
6	—	80	—	20	—	—	40	—	—	—	—	—	400

5.127. Параметры цепи, представленной на рис. 5.14, указаны в табл. 5.6. Для каждого варианта определить I, I_1, I_2, S, P, Q при $U_{вх}=300$ В. Определить также для всех вариантов значение резонансной частоты f_0 и найти значения I, I_1, I_2, $I_L(I_C)$, S, P, Q, $Q_L(Q_C)$ при работе цепи в режиме резонанса токов.

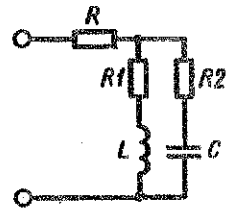

Рис. 5.14

Таблица 5.6

Варианты	R, Ом	$R1$, Ом	L, Гн	Z_1, Ом	C, мкФ	$R2$, Ом	Z_2, Ом	f, Гц
1	100	—	0,1	100	30	50	—	100
2	10	40	0,02	—	—	120	210	500
3	800	200	—	360	8	—	120	200
4	0	—	0,003	20	—	20	60	1000
5	5	0	—	12	70	3	—	400
6	200	—	0,7	250	5	0	600	50

КАЧЕСТВЕННЫЕ ЗАДАЧИ

5.128. На резисторе сопротивлением $R=15$ Ом мгновенное значение напряжения $u=120\sin(314t-\Psi_u)$ В. Записать выражение для мгновенного значения тока и определить его амплитудное и действующее значения. Как изменится ток в резисторе, если: а) частоту сигнала увеличить вдвое; б) увеличить период в два раза; в) уменьшить действующее значение напряжения в три раза?

5.129. К источнику переменного тока с частотой f и напряжением U подключена нагрузка, состоящая из последовательно включенных R, L и C. Как изменится ток в цепи, если: а) частоту источника увеличить в два раза; б) уменьшить в пять раз; в) подключить нагрузку к источнику постоянного тока?

5.130. Катушка с индуктивностью L и активным сопротивлением R подключена к источнику переменного тока с частотой f. Как изменится ток через катушку, если ее подключить к источнику постоянного тока?

5.131. Конденсатор емкостью C подключен к источнику переменного тока. Как изменится ток

в конденсаторе, если частоту: а) увеличить в три раза; б) уменьшить в два раза; в) если конденсатор подключить к источнику постоянного тока того же напряжения?

5.132. Конденсатор с емкостью C подключен к источнику переменного тока. Как изменится ток в конденсаторе, если: а) включить параллельно ему конденсатор той же емкости; б) включить последовательно с ним конденсатор той же емкости?

5.133. К источнику переменного тока подключен резистор R с последовательно включенным конденсатором C. Как изменится ток в цепи, если: а) последовательно подключается катушка индуктивностью L; б) закорачивается конденсатор C? Как при этом изменяется фазовый сдвиг между током и напряжением?

5.134. В неразветвленной цепи R, L, C выполняется условие $X_L > X_C$. Построить в общем виде векторную диаграмму. Как она изменится, если закоротить: а) катушку индуктивности, б) резистор R?

5.135. Неразветвленная цепь RLC работает в режиме резонанса напряжения. Изменится ли режим работы цепи, если: а) увеличить частоту источника в два раза; б) уменьшить частоту источника в два раза; в) последовательно в цепь включить добавочный резистор; г) увеличить напряжение питания в два раза?

5.136. Катушка с индуктивностью L и активным сопротивлением R соединены последовательно с конденсатором емкости C, и эта цепь подключена к источнику переменного тока. При некоторой частоте в цепи наступил резонанс напряжений. Равны ли при этом напряжения на конденсаторе и катушке? Как определяют момент резонанса в цепи?

5.137. В последовательную цепь RLC включен амперметр. Что покажет прибор, если при изменении частоты питания при $f = f_0$ в цепи наступил резонанс? Как изменится показание амперметра при закорачивании: а) R; б) C; в) L; г) увеличении сопротивления R в k раз? Как изменится при этом потребляемая мощность?

5.138. Ток и напряжение в цепи описываются уравнениями $i = I_m \sin(\omega t + \pi/3)$, $u = U_m \sin(\omega t - \pi/4)$. Построить векторную диаграмму в общем виде и нарисовать эквивалентную схему цепи.

5.139. Ток и напряжение в цепи описываются уравнениями $i = I_m \sin(\omega t - \pi/2)$, $u = U_m \sin(\omega t - \pi/6)$. Определить угол сдвига фаз между напряжением и током, указать характер сопротивления цепи (активный, емкостный, индуктивный).

5.140. В неразветвленной цепи RLC получен резонанс напряжения. Как изменятся коэффициент мощности и фазовый сдвиг между напряжением и током, если: а) к конденсатору цепи параллельно подключить конденсатор такой же емкости; б) увеличить сопротивление R цепи в три раза; в) последовательно в цепь включить еще катушку индуктивностью L; г) параллельно индуктивности цепи подключить катушку той же индуктивности? Для каждого из указанных режимов работы цепи построить векторную диаграмму токов и напряжений.

5.141. Построить в общем виде векторные диаграммы токов и напряжений для параллельных соединений: а) резистора R и катушки индуктивности ($L_к$, $R_к$); б) резистора R и конденсатора C с последовательно соединенным резистором $R1$; в) катушки индуктивности ($R_к$, $L_к$) и конденсатора C.

5.142. Идеальная катушка индуктивности ($R_к = 0$) и конденсатор C соединены параллельно и подключены к источнику переменного тока. При некоторой частоте f_0 источника питания в цепи наступил резонанс токов. Чему равен ток в неразветвленной части цепи? Как определить момент резонанса?

Глава 6
ТРЕХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ И УРАВНЕНИЯ

Трехфазная система. Источник трехфазного напряжения. *Трехфазная система электрических токов* (ЭДС, напряжений) — это совокупность трех синусоидальных электрических токов (ЭДС, напряжений) одной частоты, сдвинутых по фазе друг относительно друга на 120°. При равенстве амплитуд токов (ЭДС, напряжений) во всех фазах систему называют с и м м е т р и ч н о й.

Часть этой системы, где проходит один из трех токов, называют ф а з о й т р е х ф а з н о й с и с т е м ы.

Простейший трехфазный генератор — устройство, аналогичное однофазному генератору, но имеющее в отличие от последнего три одинаковые обмотки (фазы) на якоре, начала и концы которых обозначают соответственно A, B, C и X, Y, Z. Эти обмотки сдвинуты в пространстве относительно друг друга на равные углы $2\pi/3 = 120°$.

При вращении якоря в обмотках генератора индуцируются ЭДС одной частоты и равной амплитуды, сдвинутые по фазе на 120° друг относительно друга.

Если отдельные фазы генератора и приемника соединены между собой, то такую систему называют связанной трехфазной системой, в которой фазы могут быть соединены в «звезду» и «треугольник».

Соединение обмоток генератора и приемников в звезду. *Звезда* — это такое соединение, когда к началам обмоток генератора A, B, C присоединяют три линейных провода, идущих к приемнику, а концы обмоток X, Y, Z соединены в узел, называемый нейтральной или нулевой точкой.

В четырехпроводной системе к этой точке присоединен нейтральный, или нулевой, провод, в трехпроводной системе он отсутствует.

Напряжение между началами и концами фаз генератора или между линейными проводами и нейтральным (нулевым) проводом называют фазным напряжением. Напряжение между любыми двумя линейными проводами называют линейным напряжением.

Токи, проходящие по линейным проводам, называют линейными и обозначают I_A, I_B, I_C. Токи, проходящие в фазах, называют фазными.

При соединении в «звезду» линейные токи равны соответствующим фазным токам:

$$I_л = I_ф, \qquad (6.1)$$

где $I_л$, $I_ф$ — линейный и фазный токи, А.

Линейное напряжение равно разности векторов соответствующих фазных напряжений:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= \dot{U}_A - \dot{U}_B, \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_B - \dot{U}_C, \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{U}_C - \dot{U}_A. \end{aligned} \qquad (6.2)$$

Для симметричной системы напряжений

$$U_л = \sqrt{3}\,U_ф, \qquad (6.3)$$

где $U_л$, $U_ф$ — линейное и фазное напряжения, В.

Векторная сумма линейных напряжений всегда равна нулю.

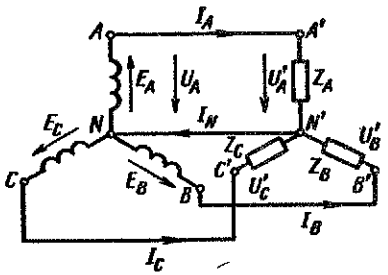

Рис. 6.1

При соединении приемников энергии в «звезду» трехфазная цепь может быть четырехпроводной (рис. 6.1) и трехпроводной.

Действующие значения токов в фазах приемников

$$I_A = U_A/Z_A; \quad I_B = U_B/Z_B; \quad I_C = U_C/Z_C, \qquad (6.4)$$

где U_A, U_B, U_C — действующие значения фазных напряжений, В; Z_A, Z_B Z_C — полные сопротивления фаз приемников, Ом.

В четырехпроводной системе ток в нейтральном проводе равен векторной сумме токов отдельных фаз (рис. 6.2):

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C, \qquad (6.5)$$

где $\dot{I}_N$ — ток в нейтральном проводе, A.

В четырехпроводной трехфазной цепи при симметричной системе напряжений и равномерной нагрузке, т. е. равенстве полных сопротивлений фаз приемников $Z_A = Z_B = Z_C$, ток в нейтральном проводе равен нулю.

Активная мощность всей цепи при неравномерной нагрузке равна сумме активных мощностей отдельных фаз:

$$P = P_A + P_B + P_C, \qquad (6.6)$$

где P — активная мощность всей цепи, Вт; P_A, P_B, P_C — активные мощности фаз A, B и C, Вт; $P_A = U_A I_A \cos\varphi_A$, $P_B = U_B I_B \cos\varphi_B$, $P_C = U_C I_C \cos\varphi_C$.

Реактивная мощность всей цепи при неравномерной нагрузке равна алгебраической сумме реактивных мощностей отдельных фаз:

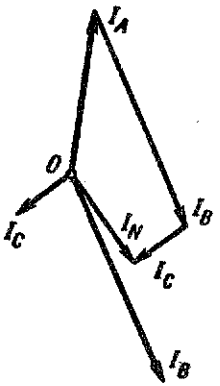

Рис. 6.2

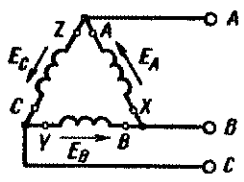

Рис. 6.3

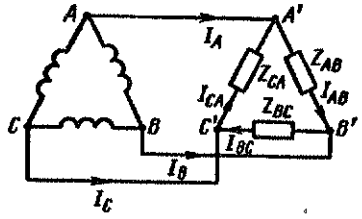

Рис. 6.4

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C, \qquad (6.7)$$

где Q — реактивная мощность всей цепи, вар; Q_A, Q_B, Q_C — реактивная мощность фаз A, B, C, вар; $Q_A = U_A I_A \sin\varphi_A$, $Q_B = U_B I_B \sin\varphi_B$, $Q_C = U_C I_C \sin\varphi_C$.

Полная потребляемая мощность цепи при неравномерной нагрузке (В · А)

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \qquad (6.8)$$

где P — активная мощность всей цепи, Вт; Q — реактивная мощность всей цепи, вар.

При симметричной системе напряжений и равномерной нагрузке мощности всей цепи:

активная

$$P = 3U_\Phi I_\Phi \cos\varphi = \sqrt{3}\, U_л I_л \cos\varphi; \qquad (6.9)$$

реактивная

$$Q = 3U_\Phi I_\Phi \sin\varphi = \sqrt{3}\, U_л I_л \sin\varphi; \qquad (6.10)$$

полная

$$S = 3U_\Phi I_\Phi = \sqrt{3}\, U_л I_л. \qquad (6.11)$$

Соединение обмоток генератора и приемников энергии в треугольник. Соединение обмоток трехфазного генератора в «треугольник» показано на рис. 6.3.

Фазные напряжения на генераторе являются и линейными:

$$U_A = U_{AB}, \quad U_B = U_{BC}, \quad U_C = U_{CA}. \qquad (6.12)$$

При соединении приемника энергии в «треугольник» (рис. 6.4) сопротивления Z_{AB}, Z_{BC}, Z_{CA} подключают непосредственно к линейным проводам, поэтому линейные напряжения являются одновременно и фазными для приемников.

Положительное направление линейных и фазных токов указано на рис. 6.4.

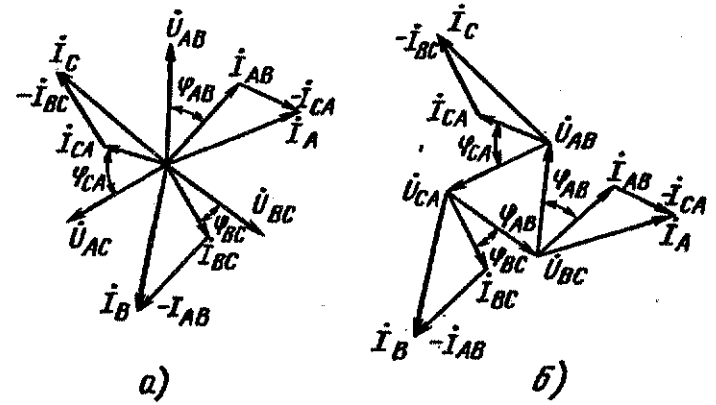

Рис. 6.5

Соотношения между фазными и линейными токами можно записать, применив первый закон Кирхгофа для узлов A, B и C (рис. 6.4, 6.5, *а*, *б*): $\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}$, $\dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}$, $\dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}$, где $\dot{I}_A$, $\dot{I}_B$, $\dot{I}_C$ — линейные токи трехфазной цепи, А; $\dot{I}_{AB}$, $\dot{I}_{BC}$, $\dot{I}_{CA}$ — токи в фазах, А.

Вектор любого линейного тока находят как разность векторов соответствующих фазных токов.

При симметричной системе напряжений и равномерной нагрузке, т. е. при $Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{CA}$, имеем $I_л = \sqrt{3}\, I_\Phi$.

Определение полной, активной и реактивной мощностей цепи при неравномерной и равномерной нагрузках рассчитывают по формулам (6.6) — (6.11).

ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ С РЕШЕНИЯМИ

6.1. К источнику трехфазной сети с линейным напряжением $U_л = 380$ В и частотой $f = 50$ Гц подключена равномерная нагрузка, соединенная по схеме «звезда», с полным сопротивлением в фазе $Z = 90$ Ом и индуктивностью $L = 180$ мГн. Определить активную, реактивную и полную мощности, коэффициент мощности, действующие значения линейного тока и напряжения. Построить векторную диаграмму токов и напряжений.

Р е ш е н и е. Фазное напряжение

$$U_\Phi = U_л/\sqrt{3} = 380/\sqrt{3} = 220 \text{ В}.$$

Фазный ток

$$I_ф = U_ф/Z = 220/90 = 2{,}45 \text{ А}.$$

Линейный ток

$$I_л = I_ф = 2{,}45 \text{ А}.$$

Реактивное сопротивление в фазе

$$X_L = \omega L = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 0{,}18 = 56{,}5 \text{ Ом}.$$

Активное сопротивление в фазе

$$R = \sqrt{Z^2 - X_L^2} = \sqrt{90^2 - 56{,}5^2} = 70 \text{ Ом}.$$

Коэффициент мощности катушки

$$\cos\varphi = R/Z = 70/90 = 0{,}778.$$

Мощности, потребляемые нагрузкой:
активная

$$P = 3U_ф I_ф \cos\varphi = 3 \cdot 220 \cdot 2{,}45 \cdot 0{,}778 = 1260 \text{ Вт} = 1{,}26 \text{ кВт},$$

или

$$P = \sqrt{3} U_л I_л \cos\varphi = 1{,}73 \cdot 380 \cdot 2{,}45 \cdot 0{,}778 = 1260 \text{ Вт} = 1{,}26 \text{ кВт};$$

реактивная

$$Q = 3U_ф I_ф \sin\varphi = 3 \cdot 220 \cdot 2{,}45 \cdot 0{,}628 = 1010 \text{ Вт} \approx 1 \text{ кВт},$$

или

$$Q = \sqrt{3} U_л I_л \sin\varphi = 1{,}73 \cdot 380 \cdot 2{,}45 \cdot 0{,}628 = 1000 \text{ Вт} = 1 \text{ кВт};$$

полная

$$S = 3U_ф I_ф = 3 \cdot 220 \cdot 2{,}45 = 1620 \text{ Вт} = 1{,}62 \text{ кВт},$$

или

$$S = \sqrt{3} U_л I_л = 1{,}73 \cdot 380 \cdot 2{,}45 = 1620 \text{ Вт} = 1{,}62 \text{ кВт}.$$

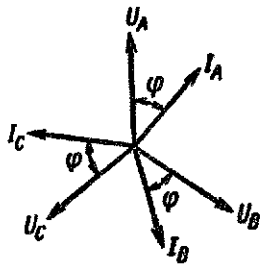

Рис. 6.6

Векторная диаграмма токов и напряжений представлена на рис. 6.6.

6.2. К четырехпроводной трехфазной сети с действующим значением линейного напряжения 220 В подключена неравномерная активная нагрузка с потребляемой мощностью в фазах

$P_A = 3$ кВт, $P_B = 1{,}8$ кВт, $P_C = 0{,}6$ кВт. Определить действующее значение тока в нейтральном проводе.

Решение. Напряжение в каждой фазе

$$U_ф = U_л/\sqrt{3} = 220/\sqrt{3} = 127 \text{ В}.$$

Токи в фазах

$$I_A = P_A/U_ф = 3000/127 = 23{,}4 \text{ А},$$

$$I_B = P_B/U_ф = 1800/127 = 14{,}2 \text{ А},$$

$$I_C = P_C/U_ф = 600/127 = 4{,}7 \text{ А}.$$

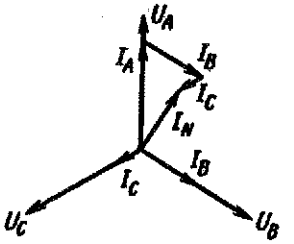

Рис. 6.7

Ток в нейтральном проводе определяем из векторной диаграммы (рис. 6.7) как сумму векторов фазных токов:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C,$$

$$\dot{I}_N = 16 \text{ А}.$$

6.3. К трехфазной четырехпроводной сети с действующим значением линейного напряжения $U_л = 380$ В и частотой $f = 50$ Гц подключен приемник энергии, соединенный по схеме «звезда». В фазу A включена катушка с индуктивностью $L = 0{,}18$ Гн и активным сопротивлением $R_A = 80$ Ом, в фазу B — резистор сопротивлением $R_B = 69$ Ом, в фазу C — конденсатор емкостью $C = 30$ мкФ с последовательно соединенным резистором сопротивлением $R_C = 40$ Ом. Определить действующие значения линейных и фазных токов, полную потребляемую нагрузкой мощность.

Решение. Фазное напряжение

$$U_ф = U_л/\sqrt{3} = 380/\sqrt{3} = 220 \text{ В}.$$

Полное сопротивление:
в фазе A

$$Z_A = \sqrt{R_A^2 + X_L^2} = \sqrt{80^2 + (2\pi \cdot 50 \cdot 0{,}18)^2} = 98 \text{ Ом};$$

в фазе B

$$Z_B = R_B = 69 \text{ Ом};$$

в фазе C

$$Z_C = \sqrt{R_C^2 + X_C^2} = \sqrt{40^2 + \left(\frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 30 \cdot 10^{-6}}\right)^2} = 110 \text{ Ом}.$$

Фазные токи

$$I_A = U_\Phi / Z_A = 220/98 = 2{,}25 \text{ А},$$
$$I_B = U_\Phi / Z_B = 220/69 = 3{,}2 \text{ А},$$
$$I_C = U_\Phi / Z_C = 220/110 = 2 \text{ А}.$$

Активная мощность:
в фазе A

$$P_A = I_A^2 R_A = (2{,}25)^2 \cdot 80 = 405 \text{ Вт};$$

в фазе B

$$P_B = I_B^2 R_B = (3{,}2)^2 \cdot 69 = 704 \text{ Вт};$$

в фазе C

$$P_C = I_C^2 R_C = 2^2 \cdot 40 = 160 \text{ Вт};$$
$$P_н = P_A + P_B + P_C = 405 + 704 + 160 = 1269 \text{ Вт}.$$

Реактивная мощность:
в фазе A

$$Q_A = I_A^2 X_L = (2{,}25)^2 \cdot 56{,}5 = 285 \text{ вар};$$

в фазе B

$$Q_B = 0;$$

в фазе C

$$Q_C = -I_C^2 X_C = -2^2 \cdot 106 = -425 \text{ вар};$$
$$Q_н = Q_A + Q_C = 285 + (-425) = -140 \text{ вар}.$$

Полная мощность нагрузки

$$S = \sqrt{P_н^2 + Q_н^2} = \sqrt{1269^2 + 140^2} = 1280 \text{ В} \cdot \text{А} = 1{,}28 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

6.4. В трехфазную сеть с действующим значением линейного напряжения 220 В и частотой 50 Гц включен потребитель, соединенный по схеме «треугольник» и имеющий равномерную нагрузку, состоящую из катушки с индуктивностью $L = 0{,}3$ Гн и последовательно включенного с ней резистора с активным сопротивлением 20 Ом в каждой фазе. Определить действующие значения линейных и фазных токов, фазное напряжение, потребляемую полную, активную и реактивную мощности.

Решение. Фазное напряжение

$$U_\Phi = U_л = 220 \text{ В}.$$

Полное сопротивление нагрузки в фазе

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{20^2 + (2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 0{,}3)^2} = 96 \text{ Ом}.$$

Ток в фазе

$$I_\Phi = U_\Phi / Z = 220/96 = 2{,}3 \text{ А}.$$

Ток линейный

$$I_л = \sqrt{3} I_\Phi = \sqrt{3} \cdot 2{,}3 = 3{,}98 \approx 4 \text{ А}.$$

Коэффициент мощности

$$\cos\varphi = R/Z = 20/96 = 0{,}208.$$

Мощности нагрузки:
активная

$$P = 3 U_\Phi I_\Phi \cos\varphi = 3 \cdot 220 \cdot 2{,}3 \cdot 0{,}208 = 317 \text{ Вт};$$

реактивная

$$Q = 3 U_\Phi I_\Phi \sin\varphi = 3 \cdot 220 \cdot 2{,}3 \cdot 0{,}97 = 1470 \text{ вар};$$

полная

$$S = 3 U_\Phi I_\Phi = 3 \cdot 220 \cdot 2{,}3 = 1520 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

6.5. К трехфазному генератору, обмотки которого соединены по схеме «звезда», подключена равномерная нагрузка, соединенная по той же схеме, через линию, обладающую активным сопротивлением $R = 2$ Ом и индуктивностью $L = 16$ мГн. Полное сопротивление нагрузки в каждой фазе $Z_н = 80$ Ом (конденсатор емкостью $C = 53$ мкФ с последовательно включенным резистором). Определить действующее значение напряжения в нагрузке, если линейное напряжение генератора $U_л = 380$ В при частоте $f = 50$ Гц. Построить векторную диаграмму токов и напряжений.

Решение. Фазное напряжение генератора

$$U_\Phi = U_л / \sqrt{3} = 380/\sqrt{3} = 220 \text{ В}.$$

Активное сопротивление нагрузки

$$R_н = \sqrt{Z_н^2 - X_C^2} = \sqrt{80^2 - \left(\frac{10^6}{2\pi \cdot 50 \cdot 53}\right)^2} = 16{,}7 \text{ Ом}.$$

Реактивное сопротивление нагрузки и линии

$$X_н = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 53 \cdot 10^{-6}} = -60 \text{ Ом},$$
$$X_л = 2\pi f L = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 16 \cdot 10^{-3} = 5 \text{ Ом}.$$

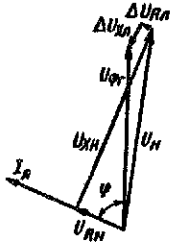

Рис. 6.8

Ток в линии

$$I_л = \frac{U_Ф}{\sqrt{(R_н + R_л)^2 + (X_н + X_л)^2}} = \frac{220}{\sqrt{(16{,}7+2)^2 + (-60+5)^2}} = 3{,}8 \text{ А}.$$

Для построения векторной диаграммы (рис. 6.8) определяем угол сдвига по фазе между напряжением на зажимах генератора и током в линии:

$$\varphi = \operatorname{arctg}\frac{X_н + X_л}{R_н + R_л} = \operatorname{arctg}\frac{-55}{18{,}7} = \operatorname{arctg}(-2{,}94);$$

$$\varphi = -71°.$$

Найдем падение напряжения на активном и индуктивном сопротивлениях линии соответственно:

$$\Delta U_{Rл} = I_л R_л = 3{,}8 \cdot 2 = 7{,}6 \text{ В},$$

$$\Delta U_{Xл} = I_л X_л = 3{,}8 \cdot 5 = 19 \text{ В}.$$

Падение напряжения на нагрузке

$$U_н = \sqrt{U_{Rн}^2 + U_{Xн}^2},$$

$$U_{Rн} = I_л R_н = 3{,}8 \cdot 16{,}7 = 63{,}6 \text{ В},$$

$$U_{Xн} = I_л X_н = 3{,}8 \cdot 60 = 228 \text{ В},$$

$$U_н = \sqrt{(63{,}6)^2 + 228^2} = 236 \text{ В}.$$

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

6.6. Три резистора, каждый сопротивлением $R = 125$ Ом, соединены по схеме «звезда» и включены в трехфазную четырехпроводную сеть. Ток каждой фазы $I = 880$ мА. Определить действующие значения фазного и линейного напряжений, линейного тока, полную потребляемую мощность нагрузки, построить векторную диаграмму токов и напряжений.

6.7. Определить действующие значения токов в каждой фазе, если в фазе A (см. задачу 6.6) сопротивление нагрузки увеличить вдвое; линейное напряжение при этом остается прежним.

6.8. Потребитель, соединенный по схеме «звезда» (нагрузка равномерная), включен в трехфазную сеть переменного тока с действующим значением линейного напряжения $U_л = 380$ В. Коэффициент мощности нагрузки $\cos\varphi = 0{,}5$, ток в фазе $I_Ф = 22$ А. Определить полное, активное и реактивное сопротивления потребителя в фазе, а также полную, активную и реактивную мощности нагрузки.

6.9. Три индуктивные катушки с активным сопротивлением $R = 34{,}2$ Ом и индуктивным сопротивлением $X_L = 23{,}5$ Ом соединены по схеме «звезда» и подключены к источнику трехфазного напряжения. Активная мощность в фазе $P_Ф = 1{,}6$ кВт. Определить действующие значения линейного и фазного напряжений, тока в фазе, полную и реактивную мощности нагрузки.

6.10. К источнику трехфазного напряжения с действующим значением линейного напряжения $U_л = 380$ В и частотой $f = 50$ Гц подключена равномерная индуктивная нагрузка, соединенная по схеме «звезда». Действующее значение тока в фазе $I_Ф = 1{,}25$ А, коэффициент мощности нагрузки $\cos\varphi = 0{,}456$. Определить полное и активное сопротивления нагрузки, ее индуктивность, полную потребляемую мощность. Построить векторную диаграмму токов и напряжений.

6.11*. В трехфазную сеть с действующим значением линейного напряжения $U_л = 220$ В включена равномерная активная нагрузка по схеме «звезда» с сопротивлением в каждой фазе $R_Ф = 20$ Ом. Определить напряжения в фазах и токи до и после перегорания предохранителя в фазе B. Построить векторные диаграммы токов и напряжений.

6.12. В трехфазную сеть с действующим значением линейного напряжения $U_л = 380$ В включена активная нагрузка, соединенная по схеме «звезда». Сопротивления резисторов в фазах A, B и C соответственно равны 15, 15 и 35 Ом. Определить действующие значения напряжений в фазах, если в фазе A произошел разрыв цепи. Построить векторную диаграмму токов и напряжений.

6.13. Полная мощность S, потребляемая равномерной нагрузкой, соединенной по схеме «звезда», состоящей из конденсатора емкостью $C = 80$ мкФ и последовательно включенного с ним резистора сопротивлением $R = 51$ Ом, в каждой фазе составляет 561 В·А. Определить действующие значения линейного и фазного напряжений, линейного и фазного

токов, активную и реактивную мощности нагрузки. Построить векторную диаграмму токов и напряжений.

6.14*. В сеть трехфазного тока включена равномерная нагрузка с активным сопротивлением в каждой фазе $R=8$ Ом и индуктивным сопротивлением $X_L=14$ Ом, соединенная по схеме «звезда». Определить напряжение в начале линии, имеющей активное сопротивление $R_л=0{,}6$ Ом, если напряжение на нагрузке $U_н=110$ В. Построить векторную диаграмму токов и напряжений.

6.15. К трехфазному генератору с ЭДС в фазе $E_ф=309$ В, обмотки которого соединены по схеме «звезда» и имеют активное и индуктивное сопротивления в фазе $R=0{,}5$ Ом и $X_L=1{,}5$ Ом, подключена равномерная нагрузка, соединенная по схеме «звезда» с активным и индуктивным сопротивлениями в фазе 10 и 12 Ом. Определить действующие значения линейного напряжения генератора и нагрузки, ток в линии и потери напряжения в линии, если $R_л=X_л=2{,}5$ Ом.

6.16. В сеть с действующим значением линейного напряжения $U_л=380$ В включен трехфазный асинхронный двигатель, обмотки которого соединены по схеме «звезда». Действующее значение линейного тока $I_л=10{,}5$ А, коэффициент мощности $\cos\varphi=0{,}85$. Определить ток и напряжение в фазе, потребляемую двигателем полную, активную и реактивную мощности.

6.17. Три одинаковые группы ламп накаливания, соединенные по схеме «звезда», включены в трехфазную четырехпроводную сеть с действующим значением линейного напряжения $U_л=380$ В. Определить полную мощность, потребляемую нагрузкой, если линейный ток $I_л=16{,}5$ А.

6.18. Приемник энергии, соединенный по схеме «звезда», подключен к трехфазной четырехпроводной сети с действующим значением линейного напряжения $U_л=220$ В и имеет в каждой фазе сопротивление $R=100$ Ом. Определить значения тока в линии и в нейтральном проводе.

6.19. На рис. 6.9, *а—г* представлены векторные диаграммы токов и напряжений для приемников энергии, соединенных по схеме «звезда» и включенных в трехфазную четырехпроводную сеть. Определить характер нагрузки в каждой фазе.

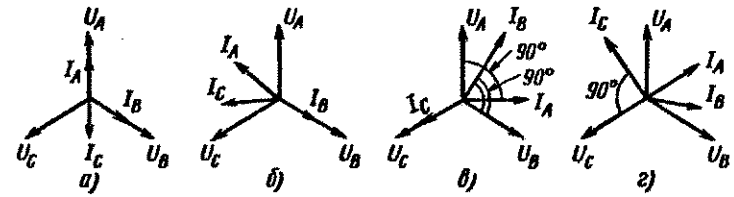

Рис. 6.9

6.20. В фазах *A*, *B* и *C* приемника энергии, подключенного к трехфазной четырехпроводной сети, действующие значения токов соответственно равны 10, 30 и 5 А. Определить ток в нейтральном проводе, если нагрузка активная.

6.21. В четырехпроводную трехфазную сеть включена неравномерная активная нагрузка, имеющая значения сопротивлений в фазах *A*, *B* и *C* соответственно 20, 40 и 10 Ом. Определить токи в фазах, потребляемую мощность нагрузки и ток в нейтральном проводе, если действующее значение линейного напряжения $U_л=380$ В.

6.22*. К трехфазной четырехпроводной сети с действующим значением линейного напряжения $U_л=380$ В подключены три группы ламп накаливания с сопротивлением в фазах *A*, *B* и *C*: $R=48$; 85,7; 250 Ом соответственно. Определить напряжение в фазе *A* и токи во всех фазах при обрыве нейтрального провода, если измеренные значения напряжений в фазах *B* и *C* следующие: $U_B=240$ В, $U_C=300$ В. Построить векторную диаграмму токов и напряжений.

6.23. В трехфазную четырехпроводную сеть с действующим значением линейного напряжения $U_л=220$ В включены лампы накаливания. В каждую фазу включены параллельно по пять ламп мощностью $P=60$ Вт каждая. Определить линейный ток, токи в фазах, ток в нейтральном проводе, сопротивление каждой фазы, напряжение каждой фазы при обрыве нейтрального провода. Построить векторную диаграмму токов и напряжений.

6.24. В трехфазную четырехпроводную сеть с действующим значением линейного напряжения $U_л=220$ В включена неравномерная активная нагрузка с потребляемой мощностью в каждой фазе в соответствии с табл. 6.1. Определить ток в нейтральном проводе.

Таблица 6.1

Варианты	Мощности, кВт		
	P_A	P_B	P_C
1	1,0	0,4	1,6
2	0,9	2,4	1,2
3	3,5	2,8	2,8
4	2,1	1,3	2,6
5	0,5	3,0	1,5
6	3,2	1,0	0,8

6.25. На рис. 6.10, *а—г* представлены схемы приемников электрической энергии. Пояснить, будет ли ток в нейтральном проводе каждой из представленных схем, построить векторные диаграммы токов и напряжений в общем виде, считая, что значения полных сопротивлений во всех фазах одинаковы.

6.26. В трехфазную четырехпроводную сеть с действующим значением линейного напряжения $U_л = 208$ В и частотой $f = 50$ Гц подключен приемник энергии в соответствии со схемой рис. 6.10, *а*, где $R = 25$ Ом, $C = 53$ мкФ. Определить действующие значения токов и напряжений в фазах, полную, активную и реактивную мощности, построить векторную диаграмму токов и напряжений и определить ток в нейтральном проводе.

6.27*. К трехфазной четырехпроводной сети с действующим значением линейного напряжения $U_л = 380$ В и частотой $f = 50$ Гц подключена нагрузка, соединенная по схеме рис. 6.10, *г*, где $R_C = X_A = X_B = 176$ Ом. Определить полную потребляемую мощность нагрузки и ток в нейтральном проводе, а также значения емкости и индуктивности нагрузки.

6.28. Из условия задачи 6.27 определить значение и характер полного сопротиления Z_B (емкостный, индуктивный, активный), которое необходимо включить в фазу B (при условии $X_A = R_C = 176$ Ом) (рис. 6.10, *г*), чтобы ток в нейтральном проводе отсутствовал.

6.29. В трехфазную четырехпроводную сеть с действующим значением напряжения в линии $U_л = 120$ В

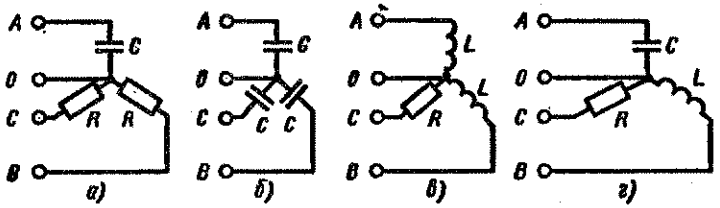

Рис. 6.10

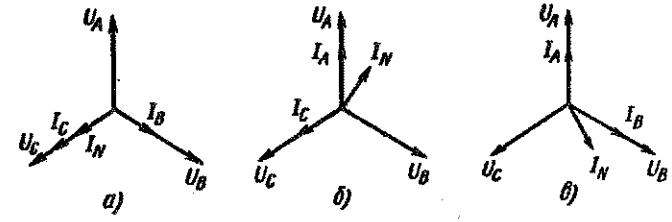

Рис. 6.11

включены лампы накаливания. В фазы A и C включено параллельно по 10 ламп мощностью $P = 40$ Вт каждая, а в фазу B — 16 ламп по 60 Вт каждая. Определить токи через каждую лампу, сопротивление каждой лампы, ток в нейтральном проводе и полную потребляемую мощность. Как изменится ток в нейтральном проводе, если в фазе B отключится половина всех ламп?

6.30. Из векторных диаграмм, представленных на рис. 6.11, *а—в* для нагрузки трехфазной четырехпроводной сети, определить в общем виде векторы токов в фазах A, B и C.

6.31*. Приемник электрической энергии включен в трехфазную четырехпроводную сеть с действующим значением фазного напряжения $U_ф = 127$ В и частотой $f = 50$ Гц. В фазу A включен резистор сопротивлением $R = 181{,}4$ Ом, в фазу B — конденсатор емкостью $C = 17{,}5$ мкФ. Определить характер (емкостный, индуктивный, активный) нагрузки, включенной в фазу C, ее полное, активное и реактивное сопротивления, необходимые для того, чтобы ток в нейтральном проводе был равен нулю.

6.32. На рис. 6.12 представлена схема для контроля наличия трехфазного напряжения в сети. Написать выражение напряжения на конденсаторе C_1 (в общем виде) при условии $C_1 \gg C$ для следующих случаев: а) при наличии напряжения во всех фазах, б) при отсутствии напряжения в одной фазе, в) при отсутствии напряжения в двух фазах одновременно.

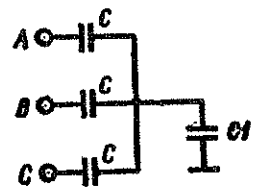

Рис. 6.12

6.33. Определить действующие значения фазных токов, активную, реактивную и полную мощности потребителя, включенного в трехфазную четырехпроводную

сеть с фазным напряжением $U_ф = 220$ В, для значений нагрузки в фазах A, B и C (R и X в каждой фазе включены последовательно), приведенных в табл. 6.2.

Таблица 6.2.

Варианты	A		B		C	
	R, Ом	X, Ом	R, Ом	X, Ом	R, Ом	X, Ом
1	—	$X_C = 125$	30	$X_L = 82{,}7$	160	$X_L = 120$
2	60	$X_C = 80$	—	$X_C = 55$	62,8	—
3	25	$X_L = 46$	196	$X_L = 100$	75	$X_C = 80{,}5$
4	75	—	69	$X_C = 40{,}5$	—	$X_C = 40$
5	50	—	24	—	75	—
6	—	$X_L = 100$	—	$X_C = 100$	—	$X_L = 100$

6.34. По условию задачи 6.33 для всех указанных вариантов построить векторные диаграммы токов и напряжений и определить ток в нейтральном проводе.

6.35. Полная потребляемая мощность нагрузки трехфазной цепи $S = 14$ кВ·А, реактивная $Q = 9{,}5$ квар. Определить коэффициент мощности нагрузки.

6.36. Три группы ламп накаливания, соединенные по схеме «треугольник» (40 ламп в параллель в каждой фазе, ток потребления каждой лампы $I = 0{,}4$ А), подключены к источнику трехфазного тока с действующим значением линейного напряжения $U_л = 127$ В. Определить действующие значения фазного напряжения, линейного тока, полную потребляемую мощность и сопротивление в фазе. Построить векторную диаграмму токов и напряжений.

6.37. В трехфазную сеть с действующим значением линейного напряжения $U_л = 120$ В включены лампы накаливания, соединенные по схеме «треугольник» с равномерной нагрузкой. Потребляемая мощность $P = 3{,}6$ кВт. Определить число ламп в каждой фазе, если мощность каждой лампы $P = 40$ Вт.

6.38. Равномерная активная нагрузка, соединенная по схеме «треугольник», подключена к источнику трехфазного напряжения. В каждую фазу (AB, BC, CA) и линию C включены амперметры A_1, A_2, A_3 и A_4 соответственно. Амперметры A_1, A_2 и A_3 показывают 17 А. Что покажет амперметр A_4 в этом случае? Что покажут все амперметры, если произойдет обрыв: а) в линии B; б) в фазе AC; в) одновременно в фазе AC и линии A?

6.39. В сеть трехфазного тока с действующим значением линейного напряжения $U_л = 120$ В включен приемник энергии, соединенный по схеме «треугольник». В фазы AB и BC включены катушки с активными сопротивлениями $R_к = 80$ Ом и индуктивными $X_L = 140$ Ом, в фазу CA включен конденсатор последовательно с резистором сопротивлением $R = 25$ Ом. Емкостное сопротивление конденсатора $X_C = 25$ Ом. Определить линейные токи, полную, активную и реактивную мощности приемника.

6.40. Три одинаковые катушки индуктивности, соединенные по схеме «треугольник», подключены к трехфазной сети с действующим значением линейного напряжения $U_л = 127$ В при частоте $f = 50$ Гц и потребляют активную мощность $P = 2{,}7$ кВт при линейном токе $I_л = 15$ А. Определить индуктивность и активное сопротивление катушек, коэффициент мощности, а также полную потребляемую мощность нагрузки.

6.41*. В трехфазную сеть включена равномерная индуктивная нагрузка, соединенная по схеме «треугольник». Коэффициент мощности нагрузки $\cos\varphi = 0{,}85$, а потребляемая активная мощность $P = 1{,}44$ кВт. Определить линейный ток и ток в фазе, активное и индуктивное сопротивления, индуктивность катушек, полную и реактивную мощности, потребляемые нагрузкой, если действующее значение напряжения в фазе $U_ф = 380$ В при частоте $f = 50$ [illegible].

6.42. Приемник электрической энергии, соединенный по схеме «треугольник», подключен к трехфазной сети с действующим значением линейного напряжения $U_л = 220$ В при частоте $f = 50$ Гц. В фазу AB включен конденсатор емкостью $C = 116$ мкФ, в фазу BC — резистор сопротивлением $R = 27{,}5$ Ом, в фазу CA — катушка с индуктивностью $L = 87{,}5$ мГн. Определить действующие значения фазных и линейных токов, полную, активную и реактивную мощности нагрузки. Построить векторную диаграмму токов и напряжений.

6.43. Три одинаковых приемника энергии, каждый из которых состоит из последовательно соединенных резистора и конденсатора, соединены по схеме «треугольник» и подключены к источнику трехфазного

тока частотой $f=50$ Гц. Потребляемая активная мощность приемника $P=8{,}4$ кВт, действующее значение тока в фазе $I_ф=20$ А. Определить активное сопротивление нагрузки, емкость конденсатора, полную потребляемую мощность, коэффициент мощности и ток в линии при действующем значении напряжения на фазе $U_ф=380$ В. Построить векторную диаграмму токов и напряжений.

6.44. К трехфазной сети с действующим значением линейного напряжения $U_л=220$ В подключена несимметричная активная нагрузка, соединенная по схеме «треугольник». Мощности, потребляемые каждой фазой, указаны в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Варианты	Мощности, Вт		
	P_{AB}	P_{BC}	P_{CA}
1	660	1100	220
2	110	1100	550
3	330	825	1430
4	1760	660	825
5	396	990	1210
6	275	528	440

Определить действующие значения линейных и фазных токов и построить векторные диаграммы токов и напряжений.

6.45*. Из векторной диаграммы определить для неравномерной нагрузки, соединенной по схеме «треугольник», линейные токи I_B и I_C и фазный ток I_{AB}, если $I_{BC}=(3{,}5<-45°)$ А, $I_{CA}=(5<0°)$ А, $I_A=(9<10°)$ А.

6.46*. Определить линейные токи I_A и I_C и фазный ток I_{BC} из векторной диаграммы для приемника, соединенного по схеме «треугольник», если $I_{AB}=(6<0°)$ А, $I_{CA}=(4<0°)$ А, $I_B=(7<30°)$ А.

6.47. На рис. 6.13 представлена векторная диаграмма токов для приемника, включенного в трехфазную сеть. Поясните, по какой схеме соединен приемник и какова его нагрузка — равномерная или неравномерная.

6.48. Указать, по какой схеме подсоединены резисторы R (рис. 6.14) к трехфазному источнику. Определить, является ли нагрузка равномерной.

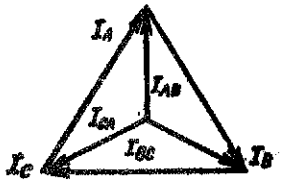

Рис. 6.13

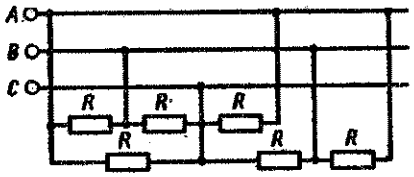

Рис. 6.14

6.49. Для приемника электрической энергии, соединенного по схеме «треугольник», построить в общем виде векторные диаграммы фазных и линейных токов (при условии равенства по модулю $Z_{AB}=Z_{BC}=Z_{CA}$) в соответствии со значениями, указанными в табл. 6.4.

Таблица 6.4

Варианты	Z_{AB}	Z_{BC}	Z_{CA}
1	R	R	R
2	X_L	X_L	X_L
3	X_C	X_C	X_C
4	R	$R_{BC}+jX_L$	$R_{CA}-jX_C$
5	X_C	R	$R_{CA}-jX_C$
6	$R_{AB}+jX_L$	X_L	$R_{CA}-jX_C$

6.50. Потребляемая активная мощность приемника энергии, соединенного по схеме «треугольник», $P=3$ кВт. В каждую фазу включены последовательно резистор сопротивлением $R=30$ Ом и катушка с индуктивностью $L=0{,}24$ Гн. Определить действующие значения тока и напряжения в фазе, линейного тока и полную потребляемую мощность. Частота сети $f=50$ Гц.

6.51. Как изменятся значения полной потребляемой мощности и коэффициента мощности по условию задачи 6.50, если в каждой фазе дополнительно включить параллельно нагрузке конденсатор емкостью $C=120$ мкФ?

6.52. На рис. 6.15 представлена схема подсоединения нагрузки к источнику трехфазного тока. Определить, равномерная или неравномерная эта нагрузка и какова схема ее соединения.

6.53*. К источнику трехфазного тока с действующим значением линейного напряжения $U_л=220$ В подключена симметричная нагрузка, соединенная по схеме «звезда», с потребляемой мощностью в каждой фазе $P=1$ кВт. Определить потребляемые линейный и фазный токи. Как изменятся их значения, если нагрузку соединить по схеме «треугольник»?

6.54*. К трехфазному источнику с действующим значением линейного напряжения

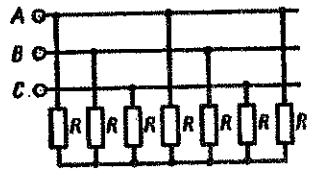

Рис. 6.15

в начале линии $U_л = 380$ В и частотой $f = 50$ Гц подключена симметричная активно-индуктивная нагрузка, соединенная по схеме «треугольник». Полное сопротивление каждой фазы $Z = 22$ Ом, коэффициент мощности $\cos\varphi = 0{,}707$. Определить напряжение на нагрузке и потребляемую ею активную мощность, линейный ток и потери активной мощности в линии, если $R_л = 0{,}62$ Ом, $X_л = 0{,}47$ Ом.

6.55. Определить линейный ток и полную потребляемую мощность приемником энергии от источника трехфазного тока с действующим значением линейного напряжения $U_л = 127$ В, если полное сопротивление фазы $Z = 49$ Ом. Приемник энергии соединен по схемам: а) «звезда», б) «треугольник».

6.56*. В сеть трехфазного тока с действующим значением линейного напряжения $U_л = 220$ В и частотой $f = 50$ Гц включена равномерная индуктивная нагрузка, соединенная по схеме «треугольник», имеющая полное сопротивление фазы $Z = 26$ Ом и коэффициент мощности $\cos\varphi = 0{,}5$. Определить действующие значения тока и напряжения в линии, индуктивность катушек и их активное сопротивление, полную потребляемую мощность нагрузки. Определить те же величины, если нагрузка соединена по схеме «звезда». Построить векторные диаграммы токов и напряжений для этих двух случаев.

6.57*. К источнику трехфазного тока с действующим значением линейного напряжения $U_л = 220$ В при частоте $f = 50$ Гц подключена нагрузка, соединенная по схеме «звезда», имеющая в каждой фазе катушку индуктивностью $L = 0{,}15$ Гн и активным сопротивлением $R = 30$ Ом. Определить значения индуктивности и активного сопротивления катушек при соединении их по схеме «треугольник» для сохранения того же значения полной потребляемой мощности и $\cos\varphi$, что и при соединении в «звезду».

6.58. Нагрузка, соединенная по схеме «звезда», потребляет от источника трехфазной сети с действующим значением линейного напряжения $U_л = 120$ В активную мощность $P = 800$ Вт при коэффициенте мощности $\cos\varphi = 0{,}8$. Определить, как изменятся линейные и фазные токи и потребляемая активная мощность при соединении той же нагрузки по схеме «треугольник».

6.59*. Три индуктивные катушки, соединенные по схеме «звезда», с активным и индуктивным сопротивлениями каждая соответственно $R = 3$ Ом и $X_L = 8$ Ом подключены к трехфазному источнику с действующим значением линейного напряжения $U_л = 220$ В при частоте $f = 50$ Гц. Определить активное и индуктивное сопротивления другого приемника, соединенного по схеме «треугольник», при сохранении того же линейного напряжения, тока и коэффициента мощности. Определить активную, реактивную и полную мощности нагрузки и построить векторные диаграммы для этих двух случаев включения потребителя.

КАЧЕСТВЕННЫЕ ЗАДАЧИ

6.60. Векторы линейных напряжений трехфазного генератора, обмотки которого соединены по схеме «звезда», показаны на рис. 6.16. Изобразить векторы фазных напряжений генератора.

6.61. Обмотки трехфазного генератора соединены по схеме «звезда». Действующее значение напряжения в фазе $U_ф = 127$ В. Определить его линейное напряжение.



Рис. 6.16

6.62. Действующее значение линейного напряжения трехфазного генератора, обмотки которого соединены по схеме «звезда», $U_л = 380$ В. Определить напряжение в фазе. Чему равно напряжение в фазе, если обмотки генератора соединить по схеме «треугольник»?

6.63. В обмотках трехфазного генератора индуцируются ЭДС E_A, E_B, E_C. Вектор ЭДС E_A расположить горизонтально и изобразить векторы ЭДС в других фазах.

6.64. Обмотки трехфазного симметричного генератора соединены по схеме «треугольник». Чему равен ток в обмотках генератора? Построить векторную диаграмму токов и напряжений.

6.65. На рис. 6.17 представлена схема неправильного соединения обмоток трехфазного генератора. Пояснить, будет ли проходить ток в обмотках генератора.

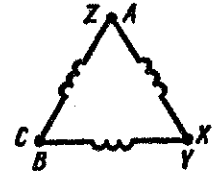

Рис. 6.17

6.66. Вольтметр, включенный в фазу B трехфазного генератора, обмотки которого соединены по схеме «звезда», показывает действующее значение наведенной ЭДС $E=120$ В. Что он покажет при включении его между началами фаз B и C? Определить амплитудное значение линейного напряжения.

6.67. Написать выражения для мгновенных значений ЭДС, индуцируемых в обмотках трехфазного генератора, если $e_A=E_{mA}\sin(\omega t-\pi/4)$. Построить векторную диаграмму для момента времени $t=0$.

6.68. К трехфазному генератору подключена равномерная активная нагрузка, соединенная по схеме «звезда». Нейтральные точки генератора и нагрузки соединены между собой. В нейтральном проводе и фазе C имеются тумблеры K_N и K_C. В фазу A включен амперметр. Написать выражение тока в фазе A для различных положений тумблеров: а) K_N замкнут, K_C разомкнут; б) K_C замкнут, K_N разомкнут; в) K_N и K_C замкнуты; г) K_N и K_C разомкнуты.

6.69. К трехфазной сети подключена равномерная нагрузка, соединенная по схеме «звезда». Амперметр включен в фазу C. Как изменится его показание при обрыве в фазе A?

6.70. К трехфазной четырехпроводной сети подключена равномерная нагрузка. В фазу C включен амперметр. Как изменятся его показания, если произойдет обрыв: а) в фазе B; б) в нейтральном проводе?

6.71. Пояснить, почему трехфазный двигатель включают в сеть без нейтрального провода.

6.72. Равномерная нагрузка соединена по схеме «звезда» и к ней с помощью кабеля подведено трехфазное напряжение. По жилам кабеля проходят линейные токи. Создается ли вокруг кабеля магнитное поле?

6.73. От трехфазного генератора к неравномерной нагрузке, соединенной по схеме «треугольник», подается напряжение. Создается ли вокруг кабеля магнитное поле?

6.74. Объяснить, почему в нейтральном проводе не устаналивают предохранитель и сечение его меньше сечения линейных проводов.

Глава 7
ТРАНСФОРМАТОРЫ

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ И УРАВНЕНИЯ

Однофазные трансформаторы. Статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения называют трансформатором.

Действующие значения ЭДС, наводимых в первичной и вторичной обмотках, определяют по формулам

$$E_1=4{,}44fw_1\Phi_m, \tag{7.1}$$

$$E_2=4{,}44fw_2\Phi_m, \tag{7.2}$$

где E_1 и E_2 — ЭДС первичной и вторичной обмоток, В; f — частота переменного тока, Гц; Φ_m — амплитудное значение магнитного потока, Вб; w_1 и w_2 — число витков первичной и вторичной обмоток.

Отношение ЭДС обмоток, равное отношению чисел витков обмоток, называют коэффициентом трансформации:

$$n=E_1/E_2=w_1/w_2\approx U_1/U_2. \tag{7.3}$$

Уравнение токов имеет вид

$$\mathbf{I}_x=\mathbf{I}_1+\mathbf{I}_2\frac{w_2}{w_1}, \tag{7.4}$$

где $\mathbf{I}_x$ — ток холостого хода трансформатора, А; $\mathbf{I}_1$, $\mathbf{I}_2$ — ток первичной и вторичной обмоток, А.

Пренебрегая током холостого хода, можно считать, что

$$I_1/I_2=w_2/w_1. \tag{7.5}$$

Токи в обмотках трансформатора обратно пропорциональны числу витков этих обмоток.

КПД трансформатора при номинальной нагрузке определяют отношением активных мощностей на выходе и входе трансформатора:

$$\eta=\frac{P_2}{P_1}=\frac{P_2}{P_2+P_\text{к}+P_x}=\frac{P_2}{P_2+P_{э1}+P_{э2}+P_x}=$$

$$=1-\frac{P_{э1}+P_{э2}+P_x}{P_2+P_{э1}+P_{э2}+P_x}, \tag{7.6}$$

где P_2 — активная мощность, потребляемая нагрузкой трансформатора, Вт; P_1 — активная мощность, поступающая в первичную обмотку из сети, Вт; $P_к$ и $P_х$ — потери мощности при коротком замыкании и холостом ходе, Вт; $P_{э1}$ и $P_{э2}$ — электрические потери в первичной и вторичной обмотках, Вт.

КПД трансформатора при любой нагрузке определяют по формуле

$$\eta = \frac{\beta S_{ном} \cos\varphi_2}{\beta S_{ном} \cos\varphi_2 + P_х + \beta^2 P_к}, \qquad (7.7)$$

где $\beta = I_2/I_{2ном}$ — коэффициент нагрузки, определяемый как отношение тока во вторичной обмотке к номинальному току вторичной обмотки; $S_{ном} = U_{1ном} I_{1ном}$ — полная мощность, потребляемая трансформатором при номинальной нагрузке, В·А; $\cos\varphi_2$ — коэффициент мощности вторичной обмотки.

Максимальный КПД соответствует следующему значению коэффициента нагрузки:

$$\beta_m = \sqrt{P_х/P_к}. \qquad (7.8)$$

Процентное изменение напряжения на вторичной обмотке

$$\Delta U_2 = \beta(U_а \cos\varphi_2 \pm U_р \sin\varphi_2), \qquad (7.9)$$

где β — коэффициент нагрузки; $U_а = \frac{R_к I_{1ном}}{U_{1ном}} \cdot 100\%$ — активная составляющая напряжения короткого замыкания; $U_р = \frac{X I_{1ном}}{U_{1ном}} \cdot 100\%$ — реактивная составляющая напряжения короткого замыкания.

Знак плюс соответствует индуктивной, а знак минус — емкостной нагрузкам.

Потери холостого хода

$$P_х = I_х U_1 \cos\varphi_1, \qquad (7.10)$$

где U_1 — напряжение первичной обмотки, В.

Потери мощности холостого хода расходуются на нагрев стали, т. е. $P_х = P_{ст}$.

Ток холостого хода в процентах от номинального значения первичного тока

$$i = \frac{I_х}{I_{ном}} \cdot 100. \qquad (7.11)$$

Полное сопротивление при холостом ходе трансформатора

$$Z_х = U_{1ном}/I_х. \qquad (7.12)$$

Активное сопротивление при холостом ходе

$$r_х = Z_х \cos\varphi_х. \qquad (7.13)$$

Потери короткого замыкания

$$P_к = I_{1ном} U_к \cos\varphi_к = I_{1ном}^2 R_к, \qquad (7.14)$$

где $U_к$ — напряжение короткого замыкания.

Мощность, потребляемая трансформатором при коротком замыкании и расходуемая на нагрев обмоток,

$$P_к = P_{э1} + P_{э2} = P_{ст}. \qquad (7.15)$$

Напряжение первичной обмотки, при котором токи в обмотках короткозамкнутого трансформатора равны номинальным, называют номинальным напряжением короткого замыкания. Это напряжение указывают к номинальному напряжению первичной обмотки:

$$U_к = \frac{U_{кном}}{U_{1ном}} \cdot 100\%. \qquad (7.16)$$

Полное сопротивление при коротком замыкании

$$Z_к = U_{кном}/I_{1ном}. \qquad (7.17)$$

Активное сопротивление короткого замыкания

$$R_к = Z_к \cos\varphi_к. \qquad (7.18)$$

Трехфазные трансформаторы. Соотношения между линейными и фазными значениями токов и напряжений при соединении:

а) в «звезду»

$$U_л = \sqrt{3}\, U_ф = 1{,}73\, U_ф, \qquad (7.19)$$

$$I_л = I_ф; \qquad (7.20)$$

б) в «треугольник»

$$U_л = U_ф, \qquad (7.21)$$

$$I_л = \sqrt{3} I_ф = 1{,}73 I_ф. \qquad (7.22)$$

Мощность независимо от схемы соединения определяют по следующим формулам:

а) активная

$$P = 3P_{\phi} = 3I_{\phi}U_{\phi}\cos\varphi = \sqrt{3}\,U_{л}I_{л}\cos\varphi; \quad (7.23)$$

б) реактивная

$$Q = 3Q_{\phi} = 3I_{\phi}U_{\phi}\sin\varphi = \sqrt{3}\,I_{л}U_{л}\sin\varphi; \quad (7.24)$$

в) полная

$$S = 3S_{\phi} = 3I_{\phi}U_{\phi} = \sqrt{3}\,I_{л}U_{л}. \quad (7.25)$$

Потери:
электрические

$$P_{э} = 3I^2R; \quad (7.26)$$

магнитные

$$P_{м} = 3P_{фх}. \quad (7.27)$$

Коэффициент трансформации (эксплуатационный) зависит от схемы соединения обмоток:

$n_{эксп л} = n$ при соединении «звезда/звезда»; (7.28)

$n_{эксп л} = n$ при соединении «треугольник/треугольник»; (7.29)

$n_{эксп л} = \sqrt{3}n$ при соединении «звезда/треугольник»; (7.30)

$n_{эксп л} = n/\sqrt{3}$ при соединении «треугольник/звезда», (7.31)

где $n = w_1/w_2 = E_1/E_2$ — коэффициент трансформации. В числителе указывают схему включения обмоток высшего напряжения, в знаменателе — схему включения обмотки низшего напряжения.

Сопротивления:
полное

$$Z = U_{л}/(\sqrt{3}\,I_{л}) = U_{\phi}/(3I_{\phi}); \quad (7.32)$$

активное

$$R = P/(\sqrt{3}\,I_{л}^2) = P/(3I_{\phi}^2). \quad (7.33)$$

Коэффициент мощности

$$\cos\varphi = P_{\phi}/(3U_{\phi}I_{\phi}). \quad (7.34)$$

Коэффициент полезного действия

$$\eta = P_2/P_1 = 3P_{2\phi}/(3P_{1\phi}) = P_2/(P_2 + \sum P). \quad (7.35)$$

Автотрансформаторы. Проходная мощность

$$S_{пр} = S_{э} + S_{м} = U_2I_1 + U_2I_{ах}, \quad (7.36)$$

где $S_{э} = U_2I_1$ — мощность, передаваемая электрическим путем; $S_{м} = U_2I_{ах}$ — мощность, передаваемая магнитным путем; U_2 — напряжение на вторичной обмотке; I_1 — ток первичной обмотки; $I_{ах}$ — ток на общем участке обмоток автотрансформатора.

Расчетная, или электромагнитная, мощность

$$S_{р} = S_{м} = S_{пр}(1 - 1/n) = S_{пр}K_{в}, \quad (7.37)$$

где $K_{в} = 1 - 1/n$ — коэффициент выгодности автотрансформатора.

Измерительные трансформаторы. Действительный коэффициент трансформации измерительных трансформаторов определяют по формулам для трансформаторов:

тока

$$K_I = I_1/I_2; \quad (7.38)$$

напряжения

$$K_U = U_1/U_2, \quad (7.39)$$

где I_1, I_2, U_1, U_2 — действительные значения первичных и вторичных токов и напряжений.

Номинальные коэффициенты трансформации:
по току

$$K_{I\,ном} = I_{1\,ном}/I_{2\,ном}; \quad (7.40)$$

по напряжению

$$K_{U\,ном} = U_{1\,ном}/U_{2\,ном}. \quad (7.41)$$

Для определения погрешностей используются формулы, приведенные в гл. 8.

Нагрузка между параллельно включенными трансформаторами распределяется обратно пропорционально напряжениям короткого замыкания ($U_{1к}$, $U_{2к}$):

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{U_{2к}}{U_{1к}}\,\frac{S_{1\,ном}}{S_{2\,ном}}, \quad (7.42)$$

где S_1 и S_2 — фактическая нагрузка трансформаторов, кВ·А; $S_{1\,ном}$ и $S_{2\,ном}$ — номинальная мощность трансформаторов, кВ·А.

ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ С РЕШЕНИЯМИ

7.1. По паспортным данным и результатам осмотра однофазного двухобмоточного трансформатора установлено, что число витков первичной обмотки

$w_1 = 424$, а вторичной обмотки $w_2 = 244$, действительное сечение сердечника $S_д = 28{,}8$ см^2; 10% приходится на изоляцию пластин, активное сопротивление первичной обмотки $R_1 = 1{,}2$ Ом, вторичной обмотки $R_2 = 1{,}4$ Ом, потери холостого хода составляют 1% от номинального значения потребляемой мощности, напряжение на первичной обмотке $U_1 = 220$ В, активный ток обмоток $I_1 = 2{,}95$ А, $I_2 = 4{,}85$ А, ток холостого хода 5% от $I_{1\,ном}$. Определить амплитудное значение магнитной индукции, ЭДС, вторичной обмотки, электрические и магнитные потери, номинальный КПД.

Решение. Приближенно можно считать, что ЭДС первичной обмотки равна напряжению питающей сети, т. е. $U_1 = E_1 = 4{,}44 f \Phi_m w_1$. Отсюда определяем магнитный поток:

$$\Phi_m = \frac{U_1}{4{,}44 f w_1} = \frac{220}{4{,}44 \cdot 50 \cdot 424} = 0{,}0023 \text{ Вб}.$$

Активное сечение стали находим как разность между действительным сечением стали и сечением изоляции: $S_а = S_д - S_{из} = 28{,}8 - 0{,}1 \cdot 28{,}8 \approx 26$ см^2 $= 26 \cdot 10^{-4}$ м^2.

Амплитудное значение магнитной индукции

$$B_m = \Phi_m / S_а = 0{,}0023/(26 \cdot 10^{-4}) = 0{,}88 \text{ Тл}.$$

Коэффициент трансформации

$$n = E_1/E_2 = w_1/w_2 = 424/244 = 1{,}73.$$

Отсюда ЭДС вторичной обмотки

$$E_2 = E_1/n = 220/1{,}73 = 127 \text{ В}.$$

Абсолютное значение тока холостого хода

$$I_х = 5\% I_{1\,ном} = 0{,}05 \cdot 2{,}95 = 0{,}147 \text{ А}.$$

Электрические потери трансформатора

$$P_э = P_{э1} + P_{э2} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 =$$
$$= 2{,}95^2 \cdot 1{,}2 + 4{,}85^2 \cdot 1{,}4 = 43{,}3 \text{ Вт}.$$

Магнитные потери

$$P_м = P_х = 1\% P_1 = 0{,}01 \cdot 220 \cdot 2{,}95 = 6{,}5 \text{ Вт}.$$

Сумма потерь

$$\sum P = P_э + P_м = 43{,}3 + 6{,}5 = 49{,}8 \text{ Вт}.$$

КПД трансформатора при номинальной нагрузке

$$\eta = \frac{P_1 - \sum P}{P_1} = \frac{220 \cdot 2{,}95 - 49{,}8}{220 \cdot 2{,}95} = 0{,}92.$$

7.2. Первичную обмотку однофазного трансформатора, потребляющего мощность $S = 12$ кВ·А, подключили к сети постоянного тока напряжением $U_- = 2$ В. При этом ток в обмотке $I_- = 20$ А, затем ее подключили к сети переменного тока с частотой 50 Гц и напряжением $U = 220$ В, амперметр показал $I_х = 5$ А, ваттметр — $P_х = 75$ Вт, а вольтметр вторичной обмотки — $U_2 = 36{,}6$ В. Определить активное, индуктивное и сопротивления постоянному току первичной обмотки, потери и КПД трансформатора, если электрические потери первичной обмотки равны электрическим потерям вторичной обмотки, а $\cos\varphi_{ном} = 0{,}9$.

Решение. Сопротивление постоянному току определяют как отношение постоянного напряжения к постоянному току:

$$R_- = U_-/I_- = 2/20 = 0{,}1 \text{ Ом}.$$

Для частоты $f = 50$ Гц сопротивление переменному току проводников малого сечения по значению равно сопротивлению постоянного тока. Полное сопротивление первичной обмотки переменному току

$$Z = U_1/I_1 = 220/5 = 44 \text{ Ом}.$$

Индуктивное сопротивление первичной обмотки

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{44^2 - 0{,}1^2} = 43{,}99 \text{ Ом}.$$

Индуктивность первичной обмотки можно определить воспользовавшись формулой индуктивного сопротивления

$$X = 2\pi f L.$$

Отсюда

$$L = \frac{X}{2\pi f} = \frac{43{,}99}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 50} = 0{,}14 \text{ Гн}.$$

Электрические потери в первичной обмотке при холостом ходе

$$P_{1\,эх} = I^2 R = 5^2 \cdot 0{,}1 = 2{,}5 \text{ Вт}.$$

Потери в стали

$$P_с = P_х - P_{1\,эх} = 75 - 2{,}5 = 72{,}5 \text{ Вт}.$$

Электрические потери при холостом ходе в данном случае $P_{1э х}=\frac{2,5}{75}\cdot 100\%=3,3\%$ от общего значения потерь холостого хода. Ввиду малого значения электрических потерь при холостом ходе ими пренебрегают и считают потери холостого хода равными потерям в стали.

Номинальный ток первичной обмотки

$$I_{1\,ном}=S_{ном}/U_{ном}=12\,000/220=54,5\text{ А}.$$

Электрические потери первичной обмотки

$$P_{1э}=I_{1\,ном}^2 R=54,5^2\cdot 0,1=297,5\text{ Вт}.$$

Сумма потерь трансформатора при условии $P_{1э}=P_{2э}$

$$\sum P=P_{1э}+P_{2э}+P_х=297,5+297,5+75=670\text{ Вт}.$$

КПД трансформатора при номинальной нагрузке

$$\eta=\frac{P_1-\sum P}{P_1}=\frac{12\,000\cdot 0,9-670}{12\,000\cdot 0,9}=0,938.$$

7.3. Однофазный двухобмоточный трансформатор испытали в режиме холостого хода и короткого замыкания. При опытах получили следующие данные: номинальное напряжение первичной обмотки $U_1=10000$ В; ток холостого хода $I_х=0,25$ А; потери холостого хода $P_х=125$ Вт; напряжение на вторичной обмотке $U_2=380$ В; номинальное напряжение короткого замыкания $U_к=500$ В; номинальный активный ток первичной обмотки $I_{1\,ном}=I_{1к}=2,5$ А; номинальный ток вторичной обмотки $I_{2\,ном}=I_{2к}=79,4$ А; потери короткого замыкания $P_к=600$ Вт.

В опыте короткого замыкания указаны суммарные электрические потери двух обмоток, значения которых одинаковы. Определить коэффициент трансформации, коэффициент мощности при холостом ходе и опыте короткого замыкания, полное, активное и индуктивное сопротивления первичной обмотки, номинальный КПД.

Решение. Определяем коэффициент трансформации: $n=w_1/w_2=E_1/E_2=U_{1\,ном}/U_{2\,ном}=10\,000/380=26,3$.

Коэффициенты мощности:

при холостом ходе

$$\cos\varphi_х=\frac{P_х}{U_{1\,ном}I_х}=\frac{125}{10\,000\cdot 0,25}=0,005;$$

при опыте короткого замыкания

$$\cos\varphi_к=\frac{P_к}{U_{1к}I_{1\,ном}}=\frac{600}{500\cdot 2,5}=0,48.$$

Сопротивления при коротком замыкании первичной обмотки:

активное

$$R_{1к}=P_{1к}/I_{1\,ном}^2=600/2,5^2=96\text{ Ом};$$

полное

$$Z_{1к}=U_{1к}/I_{1\,ном}=500/2,5=200\text{ Ом};$$

индуктивное

$$X=\sqrt{Z_{1к}^2-R_{1к}^2}=\sqrt{200^2-96^2}=175\text{ Ом}.$$

Номинальный КПД

$$\eta=\frac{P_{1\,ном}-(P_х+P_к)}{P_{1\,ном}}=\frac{10\,000\cdot 2,5-(125+600)}{10\,000\cdot 2,5}=0,97.$$

7.4. Однофазный трансформатор имеет следующие данные: номинальная мощность $S_{ном}=5000$ кВ·А; потери холостого хода $P_х=1400$ Вт; потери короткого замыкания при номинальной мощности $P_к=4500$ Вт; ток холостого хода $I_х=4\%$ от номинального значения тока первичной обмотки. Напряжение первичной обмотки $U_1=35$ кВ, напряжение вторичной обмотки $U_2=400$ В. Определить полное сопротивление первичной обмотки, коэффициент мощности при холостом ходе трансформатора, коэффициент трансформации, КПД трансформатора при номинальной нагрузке, при нагрузке 0,5; 0,75; 1,25 и коэффициенте мощности $\cos\varphi_2=0,8$. При какой нагрузке КПД трансформатора будет максимальным и чему равно его значение?

Решение. Номинальный ток первичной обмотки

$$I_{1\,ном}=S_{ном}/U_{ном}=5\,000\,000/35\,000=142,8\text{ А},$$

где $S_{ном}$ — номинальная мощность трансформатора; $U_{ном}$ — напряжение первичной обмотки.

Полное сопротивление первичной цепи

$$Z_1=U_{1\,ном}/I_{1\,ном}=35\,000/142,8=245\text{ Ом}.$$

Коэффициент мощности при холостом ходе трансформатора определяем по известному значению потерь холостого хода и току холостого хода $I_х=4\%\,I_{1\,ном}$:

$$\cos\varphi_x = \frac{P_x}{U_{1\,ном} I_x} = \frac{1400}{35\,000 \cdot 0{,}04 \cdot 142{,}8} = 0{,}007.$$

Коэффициент трансформации

$$n = U_{1\,ном}/U_{2\,ном} = 35\,000/400 = 87{,}5.$$

КПД трансформатора при номинальной нагрузке

$$\eta_{1,0} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{S_2 \cos\varphi}{S_2 \cos\varphi + P_x + P_к} =$$

$$= \frac{5\,000\,000 \cdot 0{,}8}{5\,000\,000 \cdot 0{,}8 + 1400 + 4500} = 0{,}99852.$$

КПД:
при коэффициенте нагрузки $\beta_1 = 0{,}5$

$$\eta_{0,5} = \frac{\beta_1 S_{ном} \cos\varphi_2}{\beta_1 S \cos\varphi_2 + P_x + \beta_1^2 P_к} =$$

$$= \frac{0{,}5 \cdot 5\,000\,000 \cdot 0{,}8}{0{,}5 \cdot 5\,000\,000 \cdot 0{,}8 + 1400 + 0{,}5^2 \cdot 4500} = 0{,}99873;$$

при $\beta_2 = 0{,}75$

$$\eta_{0,75} = \frac{\beta_2 S_{ном} \cos\varphi_2}{\beta_2 S_{ном} \cos\varphi_2 + P_x + \beta_2^2 P_к} =$$

$$= \frac{0{,}75 \cdot 5\,000\,000 \cdot 0{,}8}{0{,}75 \cdot 5\,000\,000 \cdot 0{,}8 + 1400 + 0{,}75^2 \cdot 4500} = 0{,}99869;$$

при $\beta_3 = 1{,}25$

$$\eta_{1,25} = \frac{\beta_3 S_{ном} \cos\varphi_2}{\beta_3 S_{ном} \cos\varphi_2 + P_x + \beta_3^2 P_к} =$$

$$= \frac{1{,}25 \cdot 5\,000\,000 \cdot 0{,}8}{1{,}25 \cdot 5\,000\,000 \cdot 0{,}8 + 1400 + 1{,}25^2 \cdot 4500} = 0{,}99831.$$

Максимальный КПД возникает при коэффициенте нагрузки

$$\beta_m = \sqrt{P_x/P_к} = \sqrt{1400/4500} = 0{,}557;$$

$$\eta_{max} = \frac{\beta_m S_{ном} \cos\varphi_2}{\beta_m S_{ном} \cos\varphi_2 + P_x + \beta_m^2 P_к} =$$

$$= \frac{0{,}557 \cdot 5\,000\,000 \cdot 0{,}8}{0{,}557 \cdot 5\,000\,000 \cdot 0{,}8 + 1400 + 0{,}557^2 \cdot 4500} = 0{,}999.$$

7.5. Однофазный автотрансформатор с первичным напряжением $U_1 = 220$ В, вторичным напряжением $U_2 = 127$ В имеет в первичной обмотке $w_1 = 254$ витка

и при полной активной нагрузке дает потребителю ток $I_2 = 9$ А. Определить число витков вторичной обмотки w_2, пренебрегая током холостого хода. Определить ток в первичной обмотке I_1, на общем участке обмотки I_2, сечение проводников S_2 на общем участке обмотки, сечение проводников S_1 на участке, где проходит только первичный ток, мощность, передаваемую электрическим путем, и коэффициент выгодности автотрансформатора, если плотность тока $J = 2$ А/мм^2.

Решение. Ввиду незначительного тока холостого хода можно считать, что наведенная ЭДС в первичной обмотке равна подводимому напряжению, напряжение вторичной обмотки равно наведенной ЭДС вторичной обмотки. Тогда коэффициент трансформации $n = E_1/E_2 = w_1/w_2 \approx U_1/U_2 = 220/127 = 1{,}73$.

Число витков вторичной обмотки

$$w_2 = w_1/n = 254/1{,}73 = 147.$$

Пренебрегая потерями, можно считать $I_1 U_1 = I_2 U_2$ или $I_2/I_1 = U_1/U_2 = n$.

Отсюда ток в первичной обмотке

$$I_1 = I_2/n = 9/1{,}73 = 5{,}2 \text{ А}.$$

Ток на общем участке

$$I_{общ} = I_2 - I_1 = 9 - 5{,}2 = 3{,}8 \text{ А}.$$

Сечения проводников:
в первичной цепи

$$S_1 = I_1/J = 5{,}2/2 = 2{,}6 \text{ мм}^2;$$

на общем участке

$$S_2 = I_{общ}/J = 3{,}8/2 = 1{,}9 \text{ мм}^2.$$

Проходная мощность

$$S_{пр} = S_э + S_{эм} = U_2 I_2 = 127 \cdot 9 = 1143 \text{ Вт}.$$

Мощности:
передаваемая во вторичную цепь магнитной связью

$$S_{эм} = S_{пр}(1 - 1/n) = 1143\,(1 - 1/1{,}73) = 483 \text{ Вт};$$

передаваемая электрическим путем

$$S_э = S_{пр} - S_{эм} = 1143 - 483 = 660 \text{ Вт}.$$

Коэффициент выгодности

$$K_в = 1 - 1/n = 1 - 1/1{,}73 = 0{,}422.$$

7.6. Трехфазный трансформатор имеет следующие данные: номинальная мощность $S_{ном} = 250$ кВ·А, высшее напряжение $U_1 = 10\,000$ В, низшее напряжение $U_2 = 400$ В, активное сечение стержня и ярма $S_с = S_я = 200$ см^2, наибольшая магнитная индукция в стержне $B_с = 1{,}4$ Тл. Найти число витков в обмотке высшего и низшего напряжений с учетом регулирования на $\pm 5\%$.

Решение. При холостом ходе падение напряжения незначительно, поэтому $E_1 \approx U_1 = 10\,000$ В.

ЭДС, индуцируемая в каждой фазе обмотки высшего напряжения, $E_1 = 4{,}44 f w_1 \Phi_m$.

При расчете трансформаторов пользуются понятием ЭДС, индуцируемой в одном витке, откуда $E_w = 4{,}44 f \Phi_m w = 4{,}44 f B_с S_с \cdot 1 = 4{,}44 \cdot 50 \cdot 1{,}4 \cdot 200 \times \times 10^{-4} \cdot 1 = 6{,}2$ В.

Предыдущая формула примет следующий вид: $E_1 = E_w w_1$.

Число витков на фазу первичной обмотки высшего напряжения $w_1 = E_1/E_w = 10\,000/6{,}2 = 1613$.

Так как трансформатор должен иметь регулировку напряжения на $\pm 5\%$, то полное число витков на фазу при повышении напряжения на 5%

$$w_1' = w_1 + 0{,}05\, w_1 = 1613 + 0{,}05 \cdot 1613 = 1693.$$

Число витков на фазу обмотки низшего напряжения

$$w_2 = E_2/E_w = 400/6{,}2 \approx 66.$$

7.7. Трехфазный трансформатор ТМ-63/10 имеет следующие данные: низшее напряжение $U_2 = 400$ В, потери при холостом ходе $P_х = 265$ Вт, потери при коротком замыкании $P_к = 1280$ Вт, напряжение короткого замыкания $U_к$ составляет 5,5% от номинального значения, ток холостого хода $I_х$ составляет 2,8% от номинального значения. Определить: а) фазные напряжение $U_ф$ при группе соединения трансформатора Y/△; б) фазный $n_ф$ и линейный $n_л$ коэффициенты трансформации: в) номинальные токи первичных и вторичных обмоток; г) КПД при нагрузке 0,5 от номинального значения и $\cos\varphi = 0{,}8$; д) активное и реактивное сопротивления фазы при

коротком замыкании; е) абсолютное значение напряжения короткого замыкания; ж) процентное изменение напряжения на вторичной цепи при $\cos\varphi = 0{,}8$, индуктивном и емкостном характере нагрузки и при номинальном токе; з) напряжение во вторичной цепи, соответствующее этим нагрузкам.

Решение. Расшифровка марки трансформатора ТМ-63/10 означает: Т — трехфазный, М — масляный, 63 кВ·А — номинальная мощность трансформатора, 10 кВ — напряжение на первичной обмотке.

Знак Y/△ означает, что первичная обмотка соединена в «звезду», вторичная — в «треугольник».

Согласно условиям задачи имеем $U_л = 10\,000$ В.

Так как первичная обмотка соединена «звездой», напряжение на фазе первичной обмотки

$$U_{1ф} = U_л/\sqrt{3} = 10\,000/1{,}73 = 5780 \text{ В}.$$

Из условия соединений вторичной обмотки «треугольником» имеем

$$U_{2ф} = U_{2л} = U_{2\,ном} = 400 \text{ В}.$$

Коэффициент трансформации по фазе

$$n_ф = U_{1ф}/U_{2ф} = 5780/400 = 14{,}45.$$

Линейный коэффициент трансформации

$$n_л = U_{1л}/U_{2л} = U_{1\,ном}/U_{2\,ном} = 10\,000/400 = 25.$$

Номинальный ток в первичной обмотке $I_{1\,ном}$ определяем из соотношения

$$S_{ном} = \sqrt{3}\, U_{1\,ном} I_{1\,ном},$$

т. е.

$$I_{1\,ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3}\, U_{1\,ном}} = \frac{63\,000}{1{,}73 \cdot 10\,000} = 3{,}64 \text{ А}.$$

Номинальный ток вторичной обмотки при условии $S_{2\,ном} \approx S_{1\,ном}$

$$I_{2\,ном} = \frac{S}{\sqrt{3}\, U_{2ном}} = \frac{63\,000}{1{,}73 \cdot 400} = 91 \text{ А}.$$

КПД при нагрузке $0{,}5 P_{ном}$

$$\eta = \frac{\beta S_{ном} \cos\varphi_2}{\beta S_{ном} \cos\varphi_2 + P_х + \beta^2 P_к} =$$

$$= \frac{0{,}5 \cdot 63\,000 \cdot 0{,}8}{0{,}5 \cdot 63\,000 \cdot 0{,}8 + 265 + 0{,}5^2 \cdot 1280} = 0{,}81,$$

где $S_{ном}$ — номинальная мощность; $P_х$ — потери холостого хода; $P_к$ — потери короткого замыкания; β — коэффициент нагрузки.

Абсолютное значение напряжения при коротком замыкании $U_к = 5{,}5\% \, U_{ном} = 0{,}055 \cdot 10\,000 = 550$ В.

Активное сопротивление фазы при коротком замыкании $R_ф = P_к/(3I_{1к}^2) = P_к/(3I_{1ном}^2) = 1280/(3 \times \times 3{,}64^2) = 32{,}2$ Ом.

Сопротивления фазы

полное

$$Z_ф = U_{1ф}/(3I_{1ф}) = 550/(3 \cdot 3{,}64) = 50{,}3 \text{ Ом};$$

реактивное

$$X_ф = \sqrt{Z_ф^2 - R_ф^2} = \sqrt{50{,}3^2 - 32{,}2^2} = 38{,}6 \text{ Ом}.$$

Для определения процентного падения напряжения воспользуемся формулой

$$U_2 = \beta\left(U_а\% \cos\varphi_2 + U_р\% \sin\varphi_2\right).$$

Напряжение короткого замыкания можно выразить через ее составляющие:

$$U_к = \sqrt{U_а^2 + U_р^2}.$$

Составляющие короткого замыкания:

активная

$$U_а = \frac{P_к}{S_{ном}} 100\% = \frac{1280}{63\,000} 100\% = 2\%;$$

реактивная

$$U_р = \sqrt{U_к^2 - U_а^2} = \sqrt{5{,}5^2 - 2^2} = 5{,}12\%.$$

Изменение напряжения на вторичной обмотке при индуктивной нагрузке $U_2 = \beta(U_а\% \cos\varphi_2 + U_р\% \sin\varphi) = = 1\,(2 \cdot 0{,}8 + 5{,}12 \cdot 0{,}6) = 4{,}6\%$, $\cos\varphi_2 = 0{,}8$ соответствует

$$\sin\varphi_2 = \sqrt{1 - \cos^2\varphi_2} = \sqrt{1 - 0{,}8^2} = 0{,}6.$$

Падению напряжения 4,6% соответствует абсолютное значение

$$\Delta U = \frac{U_2\% \, U_{2ном}}{100} = \frac{4{,}6 \cdot 400}{100} = 18{,}4 \text{ В}.$$

Отсюда напряжение на вторичной обмотке при номинальной индуктивной нагрузке

$$U_2' = U_2 - \Delta U = 400 - 18{,}4 = 381{,}6 \text{ В}.$$

Изменение напряжения на вторичной обмотке при емкостной нагрузке

$$U_2 = \beta\left(U\% \cos\varphi - U_р\% \sin\varphi\right) = = 1\,(2 \cdot 0{,}8 - 5{,}12 \cdot 0{,}6) = -1{,}472\%.$$

Падению напряжения соответствует абсолютное значение

$$\Delta U = \frac{U_2\% U_{2ном}}{100} = \frac{-1{,}472 \cdot 400}{100} = -5{,}888 \text{ В}.$$

Отсюда напряжение на вторичной обмотке при номинальной емкостной нагрузке

$$U_2'' = U_2 - \Delta U = 400 - (-5{,}888) = 405{,}888 \text{ В}.$$

7.8. Вторичная обмотка трансформатора тока ТКЛ-3 рассчитана на включение амперметра с пределом измерения 5 А. Класс точности приборов 0,5. Определить номинальный ток в первичной цепи и в амперметре, погрешности измерения приборов, если коэффициент трансформации $K_1 = 60$, а ток первичной цепи $I_1 = 225$ А.

Решение. Используя коэффициент трансформации, определим номинальный ток первичной цепи трансформатора тока. В соответствии с ГОСТами на трансформаторы тока данный трансформатор имеет номинальный ток вторичной обмотки $I_{2ном} = 5$ А, тогда $K_1 = I_1/I_2$, откуда номинальный ток первичной обмотки $I_{1ном} = K_1 I_2 = 60 \cdot 5 = 300$ А.

При токе 300 А амперметр должен отклониться на всю шкалу. При токе в первичной обмотке $I_1 = 225$ А ток амперметра

$$I_А = 5 \frac{I_1}{I_{ном}} = \frac{5 \cdot 225}{300} = 3{,}75 \text{ А}.$$

Относительная погрешность измерения тока амперметром

$$\gamma_I = \gamma_д \frac{I_{ном}}{I_1} = 0{,}5 \frac{5}{3{,}75} = 0{,}66\%.$$

Абсолютная погрешность измерения

$$\Delta I_А = \frac{\gamma_д I_2}{100\%} = \frac{0{,}5 \cdot 3{,}75}{100} = 0{,}01875 \text{ А}.$$

Абсолютная погрешность, создаваемая трансформатором тока,

$$\Delta I_т = \frac{\gamma_д I_2}{100\%} = \frac{0{,}5 \cdot 3{,}75}{100} = 0{,}01875 \text{ А}.$$

Погрешности измерения:
общая абсолютная

$$\Delta I = I_а + I_т = 0{,}01875 + 0{,}01875 = 0{,}0375 \text{ А};$$

относительная

$$\gamma = \Delta I / I_{ном}\, 100\% = 0{,}0375 \cdot 100/5 = 0{,}75\%.$$

7.9. Вольтметр на 100 В со шкалой на 100 делений подсоединен к вторичной обмотке трансформатора напряжения НОСК-6-66 ($U_1 = 6000$ В). Определить напряжение сети, если стрелка вольтметра остановилась на 95-м делении. Определить погрешности при измерении приборами первого класса точности.

Решение. По данным трансформатора напряжения определяем коэффициент трансформации:

$$K_U = U_1/U_2 = 6000/100 = 60.$$

Напряжение в первичной цепи при показании прибора

$$U_I = K_U U_2 = 60 \cdot 95 = 5700 \text{ В}.$$

Относительная погрешность измерения напряжения вольтметра

$$\gamma_U = \gamma_д \frac{U_{ном}}{U_1} = \pm 1 \frac{6000}{5700} = 1{,}05\%.$$

Общая относительная погрешность

$$\gamma = \gamma_U + \gamma_т = 1{,}05\% + 1{,}0\% = 2{,}05\%.$$

7.10. Амперметр на 5 А, вольтметр на 100 В и ваттметр на 5 А и 100 В (со шкалой на 500 делений) включены через измерительный трансформатор тока ТШЛ-20 · 10 000/5 и трансформатор напряжения НТМИ-10 000/100 для измерения тока, напряжения и мощности. Определить ток, напряжение, активную мощность и коэффициент мощности первичной цепи, если во вторичной цепи измерительных трансформаторов тока $I_2 = 3$ А, напряжение $U_2 = 99{,}7$ В, а показания ваттметра — 245 делений.

Решение. Номинальные коэффициенты трансформации трансформатора:
тока

$$K_I = I_1/I_2 = 10\,000/5 = 2000;$$

напряжения

$$K_U = U_1/U_2 = 10\,000/100 = 100.$$

Ток в первичной обмотке трансформатора

$$I_1 = K_I I_2 = 2000 \cdot 3 = 6000 \text{ А}.$$

Напряжение цепи

$$U_1 = K_U U_2 = 100 \cdot 99{,}7 = 9970 \text{ В}.$$

Активная мощность цепи

$$P_1 = K_I K_U P_2 = 2000 \cdot 100 \cdot 245 = 49\,000\,000 \text{ Вт}.$$

Коэффициент мощности цепи

$$\cos\varphi = P/(U_1 I_1) = 49\,000\,000/(9970 \cdot 6000) = 0{,}82.$$

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

7.11. Определить ЭДС первичной обмотки трансформатора, имеющей 450 витков, если трансформатор подключен к сети переменного тока с частотой $f = 50$ Гц, а магнитный поток в сердечнике $\Phi = 2{,}17 \cdot 10^{-3}$ Вб.

7.12. Определить число витков вторичной обмотки трансформатора, если при магнитном потоке в сердечнике $\Phi = 2 \cdot 10^{-3}$ Вб и частоте $f = 50$ Гц наведенная ЭДС должна составлять 220 В.

7.13. Определить сечение магнитопровода трансформатора с коэффициентом трансформации $n = 25$, подключенного к сети переменного тока с напряжением $U_1 = 10\,000$ В и с частотой $f = 50$ Гц, если магнитная индукция в магнитопроводе $B = 1$ Тл, а число витков вторичной обмотки $w_2 = 300$.

7.14. Трансформатор подключили к сети переменного тока с напряжением $U = 220$ В и частотой $f = 50$ Гц. Определить коэффициент трансформации, если сердечник имеет активное сечение $S = 7{,}6$ см^2, наибольшая магнитная индукция $B_m = 0{,}95$ Тл, а число витков вторичной обмотки $w_2 = 40$.

7.15 Первичная обмотка трансформатора подключена к сети переменного тока напряжением $U = 220$ В. К трем вторичным обмоткам трансформатора w_1, w_2, w_3 подключены резисторы с сопротивлением $R_1 = R_2 = R_3 = 20$ Ом, в которых проходят токи $I_1 = 0{,}25$ А, $I_2 = 0{,}315$ А, $I_3 = 0{,}6$ А. Определить коэффициенты трансформации для трех вторичных обмоток.

7.16. Однофазный трансформатор номинальной мощностью $S_{ном}=630$ кВ·А имеет число витков первичной обмотки $w_1=600$ и вторичной $w_2=40$. Напряжение на зажимах первичной обмотки при холостом ходе $U_x=6000$ В. Найти напряжение на выводах вторичной и плотность тока в обмотках трансформатора, если сечение проводов в первичной обмотке $S_1=30$ мм^2, а во вторичной обмотке $S_2=420$ мм^2.

7.17. Для определения потерь в стали дросселя его сначала включили в цепь постоянного тока. Сопротивление обмотки оказалось равным 2,0 Ом. Затем к дросселю подвели переменное напряжение. При этом вольтметр показал 127 В, ваттметр — 75 Вт, амперметр — 2 А. Определить потери в стали и меди дросселя.

7.18. Однофазный трансформатор с номинальной мощностью $S_{ном}=160$ кВ·А включен в сеть переменного тока с частотой $f=50$ Гц. Вычислить ЭДС первичной и вторичной обмоток, если активное сечение стержня и ярма $S=175$ см^2, наибольшая магнитная индукция в стержне $B=1{,}5$ Тл, число витков первичной обмотки $w_1=1032$, вторичной $w_2=40$.

7.19. Катушка со стальным сердечником включена в сеть переменного тока с напряжением $U=220$ В и потребляет мощность $P_1=340$ Вт при токе $I_1=8$ А. Эта же катушка при том же напряжении, но при вынутом стальном сердечнике потребляет мощность $P_2=100$ Вт при токе $I_2=10$ А. Определить потери в меди и стали.

7.20. В режиме холостого хода ток в первичной обмотке трансформатора с активным сопротивлением $R=15$ Ом и индуктивностью $L=0{,}16$ Гн равен 2,5 А. Найти действующее значение напряжения на первичной и вторичной обмотках и коэффициент мощности, если коэффициент трансформации равен 60.

7.21. Однофазный трансформатор включен в сеть с напряжением $U=380$ В, напряжение на зажимах вторичной обмотки при холостом ходе $U_2=12$ В. Определить число витков обеих обмоток w_1 и w_2, если активное сечение стержня $S_a=20$ см^2, наибольшая магнитная индукция в стержне $B=1{,}2$ Тл, частота $f=50$ Гц.

7.22. Трансформатор подключили к сети переменного тока с напряжением $U=660$ В. К вторичной

обмотке подсоединена осветительная сеть с $\cos\varphi=1$, рассчитанная на напряжение $U=220$ В. Чему равен ток вторичной обмотки, если ток в первичной обмотке $I_1=2$ А?

7.23. Однофазный трансформатор подключили к сети переменного тока с напряжением $U=380$ В и частотой $f=50$ Гц. Вторичная обмотка имеет число витков $w_2=40$ и силу тока при нагрузке 10 А. Определить коэффициент трансформации, если сердечник изготовлен из стали с сечением $S=7{,}2$ см^2, магнитная индукция составляет $B=1$ Тл.

7.24. Потери при холостом ходе трансформатора составляют $P_x=500$ Вт, при коротком замыкании $P_к=1400$ Вт. Определить КПД трансформатора, если номинальная мощность $P_{ном}=25$ кВт.

7.25. Трансформатор имеет номинальную мощность $S_{ном}=2{,}5$ кВ·А и подключен к сети переменного тока с напряжением $U=220$ В. Как изменится ток в первичной обмотке трансформатора, если коэффициент мощности вторичной обмотки возрос с 0,85 до 0,95, а мощность, потребляемая нагрузкой, $P=2200$ Вт?

7.26. Трансформатор подключили к сети переменного тока с напряжением $U=220$ В. Ток первичной обмотки $I_1=7{,}1$ А. Определить $\cos\varphi_1$, если мощность во вторичной обмотке трансформатора $P=1$ кВт, а КПД трансформатора $\eta=0{,}8$.

7.27. Ток холостого хода трансформатора $I_x=1{,}2$ А, напряжение первичной обмотки $U_1=220$ В, потери при холостом ходе $P_x=150$ Вт. Определить реактивное сопротивление при холостом ходе.

7.28. Трансформатор с номинальной мощностью $S_{ном}=1{,}5$ кВ·А имеет номинальные напряжения $U_1=380$ В и $U_2=18$ В. Потери в режиме холостого хода $P_x=140$ Вт, в режиме короткого замыкания $P_к=235$ Вт. Определить КПД трансформатора и сечение проводов обмоток, чтобы при номинальной нагрузке плотность тока не превышала $J=3{,}5$ А/мм^2.

7.29. Сопротивление первичной обмотки трансформатора постоянному току $R_1=2$ Ом, потери холостого хода $P_x=75$ Вт. Определить активную мощность, если ток холостого хода $I_x=0{,}5$ А. Оцените ошибку в определении потерь в стали, если вся мощность при холостом ходе расходуется в стали магнитопровода.

7.30. Однофазный трансформатор с номинальной мощностью $S_{ном}=1600$ кВ·А включен в сеть переменного тока с напряжением $U=10\,000$ В. При холостом ходе трансформатора напряжение на зажимах вторичной обмотки $U_2=400$ В. Определить коэффициент трансформации и число витков первичной обмотки, если число витков вторичной обмотки $w_2=32$.

7.31. Трансформатор подключили к линии электропередачи напряжением $U=6000$ В. Определить коэффициент трансформации трансформатора и число витков первичной обмотки, если число витков вторичной обмотки $w_2=250$, а напряжение в режиме холостого хода на вторичной обмотке $U_2=220$ В.

7.32. Число витков первичной обмотки трансформатора $w_1=900$, вторичной $w_2=35$. Определить напряжение холостого хода на вторичной обмотке, если трансформатор подключен к сети переменного тока с напряжением $U=6000$ В.

7.33. Определить ток во вторичной обмотке трансформатора, имеющего коэффициент трансформации 25, ток холостого хода $I_x=1$ А, если при подключении активной нагрузки ток в первичной обмотке составил $I_1=10$ А.

7.34. Определить число витков в первичной и вторичной обмотках трансформатора, подключенного к сети переменного тока с напряжением 220 В и частотой $f=50$ Гц, если в режиме холостого хода напряжение на вторичной обмотке $U_x=12$ В, а магнитный поток в сердечнике $\Phi_m=2{,}5\cdot10^{-4}$ Вб.

7.35. В понижающем трансформаторе с коэффициентом трансформации $n=15$ ток вторичной обмотки $I_2=210$ А. Найти сечение проводов первичной и вторичной обмоток, если плотность тока в них не должна превышать 3,5 А/мм^2.

7.36. Чему равен КПД трансформатора, если общие потери составляют 8% от мощности, потребляемой нагрузкой?

7.37. Однофазный трансформатор с номинальной мощностью $S_{ном}=30$ кВ·А при холостом ходе имеет напряжение 380 В. Определить номинальные токи обмоток, напряжение на зажимах вторичной обмотки, если число витков первичной обмотки $w_1=346$, а вторичной $w_2=200$. Потерями в трансформаторе пренебречь.

7.38. Однофазный трансформатор с номинальной мощностью $S_{ном}=5$ кВ·А при включении в сеть

переменного тока с напряжением 220 В при холостом ходе на вторичной обмотке имеет напряжение 15 В. Определить номинальные токи обмоток, коэффициент трансформации и число витков в первичной обмотке, если число витков во вторичной $w_2=24$ (потерями в трансформаторе пренебречь).

7.39*. Однофазный трансформатор с номинальной мощностью 1600 кВ·А имеет число витков первичной и вторичной обмоток $w_1=2193$ и $w_2=232$, активное сечение сердечника $S=530$ см^2. Вычислить магнитную индукцию в сердечнике трансформатора, активную и реактивную составляющие напряжения короткого замыкания, ЭДС, наводимую во вторичной обмотке, если первичная обмотка включена в сеть переменного тока с напряжением 6300 В. Напряжение короткого замыкания составляет 5,5%, потери при коротком замыкании трансформатора $P_к=18{,}0$ кВт, потери холостого хода $P_x=3{,}3$ кВт.

7.40. В режиме короткого замыкания трансформатора ток в первичной обмотке $I_1=0{,}9$ А, активное сопротивление $R=20$ Ом, индуктивность $L=0{,}03$ Гн, коэффициент трансформации $n=50$. Найти напряжение на первичной обмотки, ток вторичной обмотки и коэффициент мощности.

7.41. Определить номинальную мощность трансформатора, подключенного к сети переменного тока с напряжением 3000 В, если известно, что номинальный ток вторичной обмотки $I_{ном\,2}=23$ А, коэффициент трансформации $n=13$, КПД $\eta=0{,}94$.

7.42. Потери трансформатора в режиме холостого хода $P_x=150$ Вт, в режиме короткого замыкания $P_к=500$ Вт. Вычислить КПД трансформатора при номинальном режиме, если коэффициент мощности в этом режиме равен $\cos\varphi=0{,}9$, а мощность нагрузки $S_2=5$ кВ·А.

7.43. Напряжение на вторичной обмотке трансформатора, подключенного к сети переменного тока с напряжением $U=220$ В, $U_2=12$ В. Чему равны абсолютное и процентное изменения напряжения на вторичной обмотке, если коэффициент трансформации трансформатора $n=18$?

7.44. Трансформатор с номинальной мощностью $S_{ном}=1$ кВ·А имеет номинальные напряжения на обмотках $U_1=220$ В и $U_2=12$ В, КПД трансформатора $\eta=0{,}9$, коэффициент мощности вторичной

цепи $\cos\varphi = 0{,}8$. Определить номинальные токи в обмотках трансформатора.

7.45. Потери трансформатора, имеющего номинальную мощность $S = 25$ кВ·А, при холостом ходе $P_х = 450$ Вт, при коротком замыкании $P_к = 800$ Вт. Определить коэффициент нагрузки, если коэффициент мощности нагруженного трансформатора $\cos\varphi = 0{,}9$, а КПД $\eta = 94{,}5\%$.

7.46. Трансформатор работает в номинальном режиме 12 ч в сутки, а остальное время — в режиме холостого хода. Определить среднесуточный КПД трансформатора, если его номинальная мощность $S_{ном} = 100$ кВт, потери холостого хода $P_х = 1{,}2$ кВт, а потери короткого замыкания $P_к = 3{,}5$ кВт.

7.47. Номинальная мощность трансформатора $S_{ном} = 40$ кВ·А, потери в режиме холостого хода $P_х = 500$ Вт, потери в режиме короткого замыкания $P_к = 1000$ Вт. Определить коэффициент нагрузки трансформатора, если КПД $\eta = 95\%$.

7.48. Определить процентное изменение напряжения на вторичной обмотке трансформатора мощностью $S_{ном} = 100$ кВ·А при номинальном токе и $\cos\varphi_2 = 0{,}8$, если $U_к = 5{,}5\%$, а $P_к = 2500$ Вт.

7.49. Трансформатор с номинальной мощностью $S = 20$ кВ·А и $\cos\varphi = 0{,}9$ работает от переменного тока с напряжением $U = 380$ В. Ток в первичной обмотке $I_1 = 50$ А. Найти мощность, потребляемую нагрузкой, если КПД $\eta = 0{,}8$.

7.50. Потери трансформатора, имеющего номинальную мощность $S_{ном} = 1{,}5$ кВ·А, при холостом ходе $P_х = 60$ Вт и коротком замыкании $P_к = 100$ Вт. Найти номинальный КПД и мощность, потребляемую нагрузкой при $\cos\varphi = 0{,}85$, в режиме, соответствующем максимальному КПД.

7.51. Первичная обмотка трансформатора имеет активное сопротивление $R = 1{,}3$ Ом и реактивное $X = 31$ Ом. Номинальное напряжение $U_{1\,ном} = 3000$ В, а ток $I_{1\,ном} = 3{,}0$ А. Чему равно процентное изменение напряжения на вторичной обмотке, если ток в первичной обмотке $I_1 = 2{,}7$ А, а коэффициент мощности $\cos\varphi_2 = 0{,}9$?

7.52*. Определить коэффициент трансформации, номинальные токи в обмотках, ток холостого хода, КПД и процентное изменение напряжения на вторичной обмотке при $\cos\varphi_2 = 0{,}8$ и коэффициентах нагрузки $\beta_1 = 1$ и $\beta_2 = 0{,}5$, если трансформатор имеет следующие данные: номинальная мощность $S_{ном} = 160$ кВ·А, напряжение первичной обмотки $U_1 = 10\,000$ В, вторичной $U_2 = 400$ В, напряжение короткого замыкания $U_к = 4{,}5\%$, потери при холостом ходе $P_х = 540$ Вт, потери при коротком замыкании $P_к = 2650$ Вт, ток холостого хода $I_х = 2{,}4\%$.

7.53*. Однофазный трансформатор с номинальной мощностью $S = 1600$ кВ·А имеет напряжение короткого замыкания $U_к = 6{,}5\%$. Определить процентное изменение напряжения трансформатора при номинальных значениях активной нагрузки ($\cos\varphi = 1$), индуктивной нагрузки и $\cos\varphi_2 = 0{,}8$, емкостной нагрузки и $\sin\varphi_2 = 0{,}8$, если потери при коротком замыкании трансформатора $P_к = 18$ кВт.

7.54. Потери при холостом ходе трансформатора составляют $P_х = 50$ Вт, при коротком замыкании $P_к = 90$ Вт. При некоторой нагрузке трансформатор потребляет мощность $P = 8{,}5$ кВт. Определить активное сопротивление трансформатора при холостом ходе, коротком замыкании и нагрузке, если известно, что ток холостого хода $I_х = 2{,}5$ А, ток короткого замыкания $I_к = 26$ А, ток нагруженного трансформатора $I_1 = 24$ А.

7.55. Однофазный трансформатор имеет следующие данные: номинальную активную мощность $P_2 = 2{,}5$ кВт, напряжение первичной обмотки $U_1 = 660$ В, вторичной обмотки $U_2 = 127$ В; потери при холостом ходе $P_х = 50$ Вт, при коротком замыкании $P_к = 90$ Вт. Чему равен коэффициент трансформации, КПД и активные сопротивления обмоток, если $\cos\varphi = 0{,}9$?

7.56*. При испытании однофазного трансформатора мощностью $S = 6{,}5$ кВ·А были проведены опыты холостого хода и короткого замыкания. При опыте холостого хода получили следующие данные: $U_1 = 220$ В, $I_х = 3{,}0$ А, $P_х = 70$ Вт и $U_2 = 13{,}75$ В, при опыте короткого замыкания — $U_к = 4{,}0$ В, $I_{1к} = 60$ А и $P_к = 215$ Вт. Найти коэффициент трансформации, потери в стали, коэффициент мощности холостого хода, активное, индуктивное и полное сопротивления короткого замыкания трансформатора, коэффициент мощности короткого замыкания, КПД при номинальной нагрузке и $\cos\varphi_2 = 1$.

7.57*. Вычислить процентное изменение напряжения на вторичной обмотке однофазного трансформатора

при номинальной активно-индуктивной, активно-емкостной нагрузках и коэффициенте мощности, равном 1; 0,8 и 0,6, если известны следующие данные трансформатора: $S_{ном}=100$ кВ·А, $U_1=6$ кВ, $U_2=380$ В, $P_к=1970$ Вт, $U_к=4{,}5\%$.

7.58*. Определить изменение напряжения на вторичной обмотке однофазного трансформатора при коэффициенте мощности $\cos\varphi_2=0{,}8$ и номинальном токе для индуктивной и емкостной нагрузок, если известно, что номинальная мощность $S_{ном}=4000$ кВ·А, высшее напряжение $U_1=6000$ В, низшее $U_2=400$ В, напряжение короткого замыкания $u_к=7{,}5\%$, потери при холостом ходе $P_х=6700$ Вт, потери при коротком замыкании $P_к=33\,500$ Вт и частоте $f=50$ Гц.

7.59. Два однофазных трансформатора с одинаковыми номинальными мощностями 63 кВ·А, но различными напряжениями короткого замыкания ($U_{1к}=4{,}5\%$, $U_{2к}=6\%$) включены параллельно. Как распределится нагрузка между ними?

7.60*. Два однофазных трансформатора имеют следующие данные: $S_{1\,ном}=63$ кВ·А, $u_{1к}=4{,}5\%$, $S_{2\,ном}=100$ кВ·А, $u_{2к}=5\%$. Как распределится между ними суммарная мощность, равная 150 кВт, и насколько загружен каждый трансформатор, если они включены параллельно?

7.61*. Два однофазных трансформатора работают параллельно на одну нагрузку. Данные первого трансформатора $S_{1\,ном}=100$ кВ·А, $u_{1к}=10\%$, второго $S_{2\,ном}=200$ кВ·А, $u_{2к}=5\%$. Какую мощность можно получить от совместной работы трансформаторов?

7.62*. Известны данные однофазного трансформатора: $S=100$ кВ·А, $U_1=6000$ В, $U_2=400$ В, потери при холостом ходе $P_х=365$ Вт, потери при коротком замыкании $P_к=1970$ Вт. Определить КПД трансформатора при нагрузках, равных 0,25; 0,50; 0,75; 1,0 от номинальной мощности, и $\cos\varphi=0{,}8$.

7.63. Трехфазный трансформатор имеет следующие данные: номинальную мощность $S_{ном}=400$ кВ·А, высшее напряжение $U_1=10\,000$ В, низшее напряжение $U_2=400$ В, группу соединения Y/Y, активное сечение магнитопровода $S_а=280$ см^2, магнитную индукцию $B_m=1{,}435$ Тл. Определить число витков на фазу в обмотках высшего и низшего напряжений.

7.64. Трехфазный трансформатор имеет число витков на фазу в первичной обмотке $w_1=2080$, вторичной $w_2=80$. Первичное линейное напряжение $U_1=10$ кВ. Определить коэффициенты трансформации при следующих группах соединений: а) Y/Y; б) Y/Δ; в) Δ/Y; г) Δ/Δ — и напряжение на вторичной обмотке при заданных соединениях.

7.65. Трехфазный трансформатор с группой соединения обмоток Y/Y имеет фазные напряжения $U_1=3000$ В и $U_2=220$ В. Определить число витков в каждой фазе обмоток высшего и низшего напряжений, если магнитный поток в сердечнике $\Phi=2{,}1\cdot10^{-2}$ Вб, а $f=50$ Гц.

7.66. Трехфазный трансформатор с числом витков на фазу $w_1=1836$ и $w_2=135$ подключен к трехфазной сети с линейным напряжением 3000 В. Определить коэффициент трансформации и вторичные линейные напряжения для соединений обмоток Y/Y и Y/Δ.

7.67. Определить ток в первичной и вторичной обмотках трехфазного трансформатора, соединенных по схеме Y/Y, который работает на осветительную сеть с нагрузкой $P_2=45$ кВт, если известны $U_{1\,ном}=6000$ В, $U_{2\,ном}=220$ В, $\cos\varphi=0{,}9$.

7.68*. Во вторичную цепь трехфазного трансформатора, номинальная мощность которого $S_{ном}=75$ кВ·А, включена равномерно смешанная нагрузка с фазными сопротивлениями — активным $R=2$ Ом и индуктивным $X=1{,}5$ Ом, фазное напряжение вторичной обмотки $U_{2ф}=400$ В. Можно ли подключить к трансформатору еще какую-либо нагрузку или трансформатор нагружен полностью указанными потребителями?

7.69. Трехфазный трансформатор работает на осветительную сеть с нагрузкой 40 кВт. Вторичное напряжение при этой нагрузке $U_2=220$ В, а первичное $U_1=10\,000$ В. Определить вторичный и первичный токи трансформатора, если обмотки в нем соединены по схеме Y/Y, а КПД и $\cos\varphi$ равны 0,9.

7.70. Трехфазный трансформатор с номинальной мощностью $S_{ном}=100$ кВ·А и группой соединения обмоток Y/Y имеет номинальные фазные напряжения на первичной и вторичной обмотках, равные 6000 и 230 В. Чему равны номинальные токи и число витков в каждой обмотке, если активное сечение сердечника трансформатора $S=154$ см^2, наибольшая

магнитная индукция в сердечнике $B=1{,}3$ Тл, а частота $f=50$ Гц? Потерями в трансформаторе пренебречь.

7.71. При проведении опыта короткого замыкания трехфазного трансформатора были получены следующие данные: мощность короткого замыкания фазы $P_к=3700$ Вт, ток в фазе $I_ф=23$ А и напряжение в фазе $U_к=330$ В. Определить полное сопротивление короткого замыкания, активное и реактивное сопротивления для первичных обмоток трансформатора.

7.72. Трехфазный трансформатор с группой соединения обмоток Y/Y имеет следующие паспортные данные: $S_{ном}=25$ кВ·А, $P_х=125$ Вт, $P_к=600$ Вт. Найти КПД каждой фазы, если коэффициенты мощности при номинальных нагрузках равны $\cos\varphi_1=0{,}85$; $\cos\varphi_2=0{,}80$; $\cos\varphi_3=0{,}90$.

7.73. Трехфазный масляный трансформатор типа ТМ-10/6, соединенный по схеме Y/Y, имеет следующие паспортные данные: мощность $S_{ном}=10$ кВ·А, напряжение первичной обмотки $U_1=6000$ В, напряжение вторичной обмотки $U_2=400$ В, напряжение короткого замыкания $u_к=5{,}5\%$, ток холостого хода $I_х=0{,}01I_{1\,ном}$, потери при холостом ходе $P_х=105$ Вт, потери при коротком замыкании $P_к=335$ Вт. Определить номинальные токи, активное и реактивное сопротивления первичной обмотки.

7.74*. По паспортным данным трехфазного трансформатора, опыту холостого хода и короткого замыкания определить процентное изменение напряжения на вторичной обмотке при номинальных индуктивной и емкостной нагрузках и $\cos\varphi_2=0{,}8$. Паспортные данные трансформатора: $S_{ном}=5600$ кВ·А, $f=50$ Гц, $U=10\,000/3150$ В, $I=323/1025$ А.

Из опыта холостого хода: $I_х=0{,}0263$ $I_{1\,ном}=27{,}12$ А; $P_х=19120$ Вт.

Из опыта короткого замыкания: $U_к=0{,}0523$ $U_{ном}=523$ В; $P_к=57500$ Вт.

7.75. Паспортные данные трансформатора ТМ-6300/10: частота $f=50$ Гц, напряжение вторичной обмотки $J_2=400$ В, номинальный ток первичной обмотки $I_{1\,ном}=364$ А, ток вторичной обмотки $I_{2\,ном}=9024$ А, потери при холостом ходе $P_х=9{,}0$ кВт. Напряжение короткого замыкания $u_к=6{,}5\%$ от $U_{1\,ном}$,

потери при коротком замыкании $P_к=46{,}5$ кВт. Определить процентное изменение напряжения на вторичной обмотке при индуктивном и емкостном характере нагрузки при $\beta=1{,}25$ и $\cos\varphi_2=0{,}8$. Найти напряжение во вторичной цепи, соответствующее этим нагрузкам.

7.76. Определить напряжение на вторичной обмотке трехфазного трансформатора при номинальных индуктивной и емкостной нагрузках и $\cos\varphi_2=0{,}8$, если номинальная мощность трансформатора $S_{ном}=100$ кВ·А, номинальное напряжение первичной обмотки $U_{1\,ном}=6$ кВ, вторичной $U_{2\,ном}=380$ В, потери при холостом ходе $P_х=365$ Вт, при коротком замыкании $P_к=1970$ Вт, напряжение короткого замыкания $U_к=4{,}5\%$ $U_{1\,ном}$.

7.77. В трехпроводную трехфазную систему параллельно включили три одинаковых трехфазных повышающих трансформатора с коэффициентом трансформации $n=15$. Определить фазное и линейное напряжения на вторичных обмотках, если линейное напряжение в трехпроводной системе $U_1=400$ В и обмотки соединены по схемам Y/Y; Y/Δ, Δ/Y.

7.78. Определить число витков вторичной обмотки трансформатора тока, если первичная обмотка рассчитана на ток $I=1000$ А и имеет один виток, а вторичная — на $I=5$ А.

7.79. Определить число витков вторичной обмотки трансформатора напряжения, если первичная обмотка рассчитана на напряжение $U=6000$ В и имеет 12 000 витков, а вторичная — на $U=100$ В.

7.80. Через амперметр, включенный в цепи через трансформатор тока ТЛ-35К, рассчитанный на ток 600/5 А, проходит ток $I_2=4{,}25$ А. Определить ток в первичной цепи.

7.81. Приближенно определить коэффициент трансформации измерительных клещей, если известно, что вторичная обмотка имеет 200 витков.

7.82. Определить приближенно число витков первичной и вторичной обмоток измерительного трансформатора напряжения 6000/100 при условии, что допустимое напряжение изоляции на один виток составляет не более 0,85 В.

7.83. Трансформатор напряжения имеет первичную и вторичную обмотки с числом витков $w_1=20\,000$, $w_2=200$. К вторичной обмотке присоединен вольтметр, рассчитанный на напряжение

100 В. Определить коэффициент трансформации и максимальное напряжение, которое можно измерить в сети.

7.84. Измерительный трансформатор тока имеет обмотки с числом витков $w_1=2$ и $w_2=100$. Определить коэффициент трансформации, номинальный ток первичной обмотки трансформатора и тока вторичной обмотки, если к вторичной обмотке подключен амперметр, рассчитанный на 5 А, а ток потребителя $I=95$ А.

7.85. К трансформатору тока ТКЛ-3, рассчитанному на ток 150/1 А, присоединен амперметр, рассчитанный на 1,0 А. Определить показания амперметра при номинальном токе, проходящем через первичную обмотку трансформатора.

7.86. Амперметр со шкалой 0—500 делений, рассчитанный на 5 А, включен в цепь через трансформатор тока 400/5 А. Какой ток проходит в первичной и вторичной обмотках трансформатора, если амперметр показывает 350 делений?

7.87. Для измерения тока в цепи трехфазного синхронного генератора, имеющего номинальную мощность $S_{ном}=2500$ кВ·А при линейном напряжении $U_л=6000$ В, используется амперметр, рассчитанный на номинальный ток 5 А и присоединяемый к сети через измерительный трансформатор тока. Определить необходимый коэффициент трансформации этого трансформатора.

7.88. Обмотки ваттметра, рассчитанные на номинальную мощность $P_{ном}=500$ Вт, присоединены к сети переменного тока через измерительный трансформатор напряжения НОМ-6 (3000/100 В) и трансформатор тока ТПЛ-10 (440/5 А). Определить мощность первичной цепи, если мощность в цепи ваттметра $P=380$ Вт.

7.89. Ваттметр, имеющий пределы измерения $U=150$ В, $I=5$ А и число делений шкалы 150, включены через измерительный трансформатор напряжения 6000/100 В и трансформатор тока 500/5 А. Определить мощность первичной цепи, если показания ваттметра — 124 деления.

7.90. К трансформатору напряжения НОМ-10 (номинальное напряжение первичной обмотки 10 000 В) подключили вольтметр, рассчитанный на 150 В. Определить напряжение на вольтметре, если напряжение в первичной цепи понизилось до 9950 В.

7.91. Через трансформаторы тока 500/5 А и напряжения 6000/100 В в сеть переменного тока включены амперметр, вольтметр и ваттметр. Определить ток, напряжение, активную мощность и коэффициент мощности цепи, если амперметр показал $I=4$ А, вольтметр — $U=100$ В, а ваттметр — 350 Вт.

7.92*. Для измерения мощности и $\cos\varphi$ использованы вольтметр, рассчитанный на 150 В, амперметр и ваттметр. Амперметр и ваттметр подключены в сеть через трансформаторы тока 50/5 А. Амперметры рассчитаны на ток 5 А со шкалой на 100 делений, ваттметры — на 150 В и 5 А со шкалой на 150 делений. Определить потребляемую мощность цепи и $\cos\varphi$, если вольтметр показал $U=122$ В, стрелки амперметров отклонились на 76 делений, а стрелки ваттметров — на 80 делений.

7.93. Первичная обмотка регулировочного автотрансформатора имеет 1200 витков и включена в сеть напряжением 380 В. Какое наименьшее напряжение можно получить на выводах вторичной обмотки, если толщина щетки автотрансформатора перекрывает три витка?

7.94. Определить показания вольтметра, подключенного к вторичной цепи автотрансформатора, если число витков первичной обмотки $w_1=180$, а подвижный контакт автотрансформатора последовательно устанавливается в положения, когда число витков вторичной обмотки становится равным 25, 50, 100, 180. Автотрансформатор подключен к сети переменного тока с напряжением 220 В.

7.95. Обмотка однофазного автотрансформатора имеет 1730 витков и включена в сеть с напряжением 660 В. От какого витка следует сделать отвод для вторичной обмотки, чтобы напряжение на нагрузке составляло $U_2=380$ В?

7.96. Автотрансформатор включен в сеть переменного тока с напряжением 220 В. Ток в первичной обмотке $I_1=9$ А. Определить ток во вторичной цепи, если $U_2=127$ В. Потерями и автотрансформаторе пренебречь.

7.97. Автотрансформатор с числом витков 450 подключен в сети переменного тока с напряжением 220 В. В каких местах нужно сделать выводы, чтобы можно было снимать напряжения 10, 50, 75, 100, 127 и 150 В?

7.98. Однофазный трансформатор заменили автотрансформатором, причем номинальные напряжения в первичной и вторичной обмотках и токи во вторичных обмотках в обоих случаях одинаковы и составляют $U_1 = 380$ В; $U_2 = 220$ В; $I_2 = 9$ А. Чему равен коэффициент выгодности автотрансформатора?

КАЧЕСТВЕННЫЕ ЗАДАЧИ

7.99. В трансформаторе, понижающем напряжение с 220 до 6,3 В, применены проводники сечениями $S_1 = 1$ мм^2 и $S_2 = 9$ мм^2. Какой обмотке, высшего или низшего напряжения, принадлежит провод сечением $S_1 = 1$ мм^2?

7.100. Первичная обмотка автотрансформатора имеет $w_1 = 600$ витков, коэффициент трансформации $n = 20$. Определить число витков вторичной обмотки.

7.101. Для преобразования напряжения в начале и конце линии электропередачи применили трансформатор с коэффициентом трансформации $n = 26$. Во сколько раз понизятся потери в проводах ЛЭП, если передаваемая мощность и сечение проводов остались такими же, как до установки трансформаторов?

7.102. В линии электропередачи трансформаторы с коэффициентом трансформации $n = 20$ заменили на трансформаторы с коэффициентом трансформации $n = 50$. Как и во сколько раз изменятся потери энергии в проводах линии электропередачи?

7.103. Изменится ли магнитный поток в сердечнике трансформатора, если во вторичной обмотке ток возрос в три раза?

7.104. Увеличится или уменьшится наводимая ЭДС во вторичной обмотке трансформатора при замене ферромагнитного сердечника на медный?

7.105. Имеется два одинаковых трансформатора. У одного сердечник изготовлен из листов электротехнической стали толщиной 0,35 мм, у другого — 0,5 мм. У какого из трансформаторов более высокий КПД?

7.106. Как повлияет на ток холостого хода и магнитную индукцию уменьшение числа витков первичной обмотки, если на нее подается номинальное напряжение?

7.107. Изменятся ли потери на гистерезис, если сердечник дросселя из отдельных листов электротехнической стали заменить на монолитный сердечник из стали той же марки?

7.108. Возрастут ли потери на гистерезис, если магнитопровод из листов электротехнической стали толщиной 0,35 мм заменить на магнитопровод из стали той же марки, но толщиной 0,5 мм?

7.109. Первичную обмотку однофазного трансформатора вместо номинального напряжения $U_{ном} = 220$ В включили в сеть с напряжением 127 В. Какие потери уменьшатся в большей степени: на вихревые токи или на гистерезис?

7.110. Первичную обмотку однофазного трансформатора уменьшили на несколько витков. Уменьшится или увеличится напряжение на выводах вторичной обмотки, если первичная обмотка включена под номинальное напряжение?

7.111. Две части (с одинаковым числом витков) вторичной обмотки однофазного трансформатора соединили между собой последовательно. Возможен ли однозначный ответ на вопрос: будет ли на выводах вторичной обмотки напряжение, если первичная находится под номинальным напряжением и в каждой части вторичной наводится ЭДС?

7.112. ЭДС первичной обмотки при активно-индуктивной нагрузке больше или меньше подводимого напряжения?

7.113. Почему при удалении сердечника из катушки передаваемая энергия из первичной обмотки во вторичную резко понижается?

7.114. Какой из трансформаторов — с масляным или воздушным охлаждением — обладает большей мощностью, если масса активных частей и подводимое напряжение одинаковы?

7.115. Два трансформатора одинаковой мощности рассчитаны на одно и то же номинальное напряжение. У первого число витков первичной и вторичной обмоток больше, чем у второго. У какого трансформатора сечение сердечника будет меньшим?

7.116. При испытании однофазного трансформатора в режиме холостого хода на первичную обмотку подали завышенное напряжение. Уменьшится или увеличится ток холостого хода?

7.117. Изменится ли КПД трансформатора, если магнитопровод из электротехнической стали заменить

на магнитопровод, изготовленный из листов обыкновенной стали?

7.118. Увеличится или уменьшится КПД трансформатора при неизменном подводимом напряжении, если ЭДС первичной обмотки возрастет?

7.119. В каком случае напряжение на вторичной обмотке нагруженного трансформатора может оказаться выше напряжения холостого хода?

7.120. Может ли в нагруженном трансформаторе ток первичной обмотки быть равным или меньшим по значению тока холостого хода?

7.121. Первичную обмотку трехфазного трансформатора вместо соединения по схеме «треугольник» соединили по схеме «звезда». Как повлияет такое соединение на ток холостого хода; на потери в стали, в меди; на значение магнитной индукции?

7.122. Как отличаются по массе магнитопровод и обмотка обычного трансформатора от автотрансформатора, если коэффициенты трансформации одинаковы: $n=1{,}73$? Мощность и номинальные напряжения аппаратов одинаковы.

7.123. Во вторичной цепи трансформатора тока произошел обрыв. Уменьшатся или увеличатся потери трансформатора? К чему приводит разрыв вторичной цепи трансформатора тока?

7.124. Определите вектор тока холостого хода трансформатора, если активная и реактивная составляющие $I_a=1$ А; $I_p=5$ А.

7.125. Постройте упрощенную векторную диаграмму холостого хода трансформатора, если известны $U_1=220$ В; $I_a=0{,}5$ А; $I_p=2{,}5$ А; $\Phi_m=0{,}02$ Вб.

7.126. Постройте упрощенную векторную диаграмму холостого хода трансформатора по следующим данным: $U_1=380$ В; $I_x=1$ А; $P_x=40$ Вт, а $\Phi_m=0{,}025$ Вб.

7.127. Известны следующие паспортные данные трансформатора ТМ=25/10: $U_2=400$ В; $u_к=4{,}5\%$; $I_x=3{,}2\%$; $P_x=0{,}125$ кВт; $P_к=0{,}6$ кВт. Во сколько раз уменьшится вектор первичного напряжения, если масштаб при построении векторных диаграмм короткого замыкания и холостого хода оставлен неизменным?

7.128. По условиям задачи 7.127 определите вектор напряжения вторичной обмотки при опыте холостого хода и короткого замыкания.

7.129. В первом случае трансформатор имел активно-индуктивную, а во втором — активно-емкостную нагрузку, причем ток во вторичной обмотке оставался неизменным. В каком случае вектор тока первичной обмотки будет меньше? Изменится ли $\cos\varphi$ между векторами первичного тока и напряжения? На сколько градусов изменится положение вектора тока вторичной обмотки относительно вектора магнитного потока?

Глава 8
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ И УРАВНЕНИЯ

Основные метрологические понятия. *Измерение* — это нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств.

Чтобы произвести измерение, т. е. сравнить измеряемую величину с единицей измерения, необходимо иметь эту единицу — меру. *Мера* — это средство измерения, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера.

При измерениях используют не только меры, но и измерительные приборы, с помощью которых выполняют процесс сравнения измеряемой величины с единицей измерения.

Измерительный прибор — средство измерения, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем (ГОСТ 16263—70).

Электроизмерительные приборы подразделяют на две группы: приборы непосредственной оценки и приборы сравнения.

Приборы *непосредственной оценки* (амперметры, вольтметры, омметры, ваттметры и т. д.) позволяют определить числовое значение измеряемой величины по отсчетному устройству.

Приборы *сравнения* (мосты, компенсаторы) применяют для сравнения измеряемой величины с мерой. Их используют для проведения более точных измерений.

Показание прибора — это значение измеряемой величины, определяемое сделанным отсчетом и переводным множителем (например, ценой деления).

Отсчет — число, прочитанное по отсчетному устройству измерительного прибора (по шкале, цифровому табло).

Погрешности измерений. *Абсолютная погрешность* — это разность между измеренным и действительным значениями измеряемой величины:

$$\Delta A = A_{изм} - A, \qquad (8.1)$$

где $A_{изм}$, A — измеряемое и действительное значения; ΔA — абсолютная погрешность.

Абсолютную погрешность выражают в единицах измеряемой величины. Абсолютную погрешность, взятую с обратным знаком, называют поправкой.

Относительная погрешность β равна отношению абсолютной погрешности ΔA к действительному значению измеряемой величины и выражается в процентах:

$$\beta = \frac{\Delta A}{A} 100. \qquad (8.2)$$

Приведенная погрешность измерительного прибора — это отношение абсолютной погрешности к номинальному значению. Номинальное значение для прибора с односторонней шкалой равно верхнему пределу измерения, для прибора с двусторонней шкалой (с нулем посередине) — арифметической сумме верхних пределов измерения:

$$\beta_{пр} = \frac{\Delta A}{A_{ном}} \cdot 100\%. \qquad (8.3)$$

Наибольшее значение приведенной погрешности в рабочем диапазоне шкалы измерительного прибора называют основной приведенной погрешностью, выражают в процентах и указывают на шкале этого прибора. В соответствии с ГОСТ 9763—61 приборы подразделяются на восемь классов точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5 и 4,0.

Измерение напряжений и токов. Измерение напряжения производят с помощью вольтметра, подключаемого параллельно тому участку цепи, на котором производят измерение.

Для расширения пределов измерения вольтметра на постоянном токе применяются добавочные сопротивления, на переменном — добавочные сопротивления и измерительные трансформаторы напряжения.

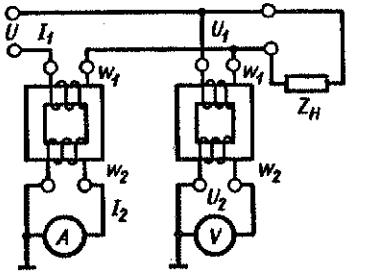

Рис. 8.1

Добавочное сопротивление включают последовательно с вольтметром:

$$r_д = r_В (m-1), \qquad (8.4)$$

где $r_д$ — добавочное сопротивление, Ом; $r_В$ — сопротивление вольтметра, Ом; m — число, показывающее, во сколько раз необходимо увеличить предел измерения вольтметра.

Измерительный трансформатор напряжения преобразует большое переменное напряжение в относительно малое, измеряемое электроизмерительным прибором с небольшим пределом измерения, и работает в режиме, близком к режиму холостого хода (рис. 8.1):

$$U_1 = K_{U ном} U_2, \qquad (8.5)$$

где $K_{U ном}$ — номинальный коэффициент трансформации напряжения; U_1 — измеряемое напряжение, В; U_2 — показание прибора, В.

Измерение токов в ветвях производят с помощью амперметров, включаемых в них последовательно.

Для измерения тока, большего номинального значения амперметра, в цепях постоянного тока применяют шунты, а в цепях переменного тока — измерительные трансформаторы тока.

Шунт — это сопротивление, включаемое последовательно в измеряемую цепь, а амперметр подключается к нему параллельно.

Сопротивление шунта

$$r_ш = r_A / (n-1), \qquad (8.6)$$

где r_A — сопротивление амперметра, Ом; $n = I / I_A$ — коэффициент шунтирования, показывающий, во сколько раз увеличивается предел измерения амперметра с включенным шунтом; I — измеряемый ток, А; I_A — ток, проходящий через амперметр, А.

Измерительный трансформатор тока преобразует большой переменный ток в относительно малый, который может быть измерен непосредственно электроизмерительным прибором. Схема включения трансформатора показана на рис. 8.1. Измерительный трансформатор тока работает в режиме, близком к режиму короткого замыкания. Основной его характеристикой является номинальный коэффициент трансформации $K_{I\,ном}$, на который умножают показание прибора для определения измеряемого тока:

$$I_1 = K_{I\,ном} I_2. \qquad (8.7)$$

Измерение сопротивлений. Наиболее распространенный метод — метод амперметра и вольтметра, основанный на применении закона Ома для участка цепи:

$$R_x = U/I, \qquad (8.8)$$

где R_x — измеряемое сопротивление, Ом; U — падение напряжения на измеряемом сопротивлении, В; I — ток, проходящий через это сопротивление, А.

Измерение сопротивлений этим методом можно производить по двум схемам, представленным на рис. 8.2.

Если не требуется большая точность измерений, то можно воспользоваться показаниями амперметра и вольтметра и рассчитать сопротивление по формуле (8.8). Для измерения малых сопротивлений с большей точностью можно использовать схему рис. 8.2, *а*, для которой

$$R_x = \frac{U}{I - U/r_в}, \qquad (8.9)$$

где U — напряжение, измеренное вольтметром, В; I — ток, измеренный амперметром, А; $r_в$ — сопротивление вольтметра, Ом.

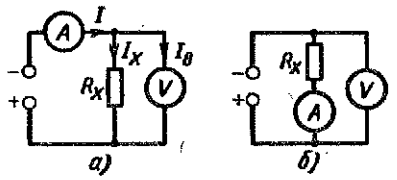

Рис. 8.2

Схему рис. 8.2, *б* можно использовать для определения действительного значения больших сопротивлений; тогда

$$R_x = \frac{U - I r_A}{I}, \qquad (8.10)$$

где U — напряжение, измеренное вольтметром, В; I — ток, измеренный амперметром, А; r_A — сопротивление амперметра, Ом.

Значительно точнее сопротивления могут быть измерены с помощью мостов постоянного тока.

Простейшая схема моста представлена на рис. 8.3. В одно из плеч моста включают измеряемое сопротивление и, изменяя сопротивление любого плеча, добиваются отсутствия тока в измерительной диагонали — индикатор нуля должен показать нуль. Тогда

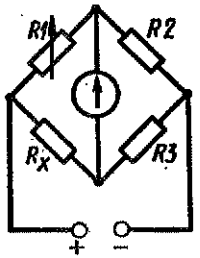

Рис. 8.3

$$R_x = R_1 \frac{R_3}{R_2}. \qquad (8.11)$$

Измерение мощности. Мощность цепи постоянного тока можно определить с помощью амперметра и вольтметра:

$$P = UI,$$

где U — показание вольтметра, включенного на участке, где определяется мощность, В; I — показание амперметра на том же участке цепи, А.

Для измерения той же мощности может быть использован электродинамический ваттметр. Угол поворота подвижной части этого прибора, включенного в цепь, пропорционален мощности, значения которой нанесены на шкалу прибора: $\alpha = KP$.

Активную мощность в цепях переменного тока измеряют также ваттметрами. Для расширения пределов измерения применяются измерительные трансформаторы тока и напряжения.

В трехфазной трехпроводной цепи при равномерной нагрузке для измерения активной мощности применяют один ваттметр, включенный в одну из фаз. Для определения мощности всей трехфазной цепи надо показания ваттметра умножить на три, т. е.

$$P = 3P_1 = 3U_ф I_ф \cos\varphi. \qquad (8.12)$$

В трехфазной трехпроводной цепи при равномерной или неравномерной нагрузке активную мощность

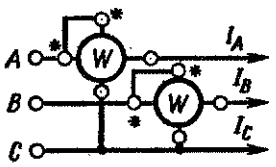

Рис. 8.4

всей цепи измеряют с помощью двух ваттметров (рис. 8.4):

$$P = P_1 \pm P_2, \qquad (8.13)$$

где P_1, P_2 — показания первого и второго ваттметров, Вт:

$$P_1 = U_{AC} I_A \cos\varphi_1; \quad P_2 = U_{BC} I_B \cos\varphi_2, \qquad (8.14)$$

где φ_1 — фазовый сдвиг между векторами U_{CA} и I_A; φ_2 — фазовый сдвиг между векторами U_{BC} и I_B.

Для равномерной нагрузки

$$P_1 = U_л I_л \cos(30° - \varphi); \quad P_2 = U_л I_л \cos(30° + \varphi), \qquad (8.15)$$

где φ — фазовый сдвиг между напряжением и током в фазе.

В трехфазной четырехпроводной цепи для измерения активной мощности применяют метод трех ваттметров. Активная мощность всей цепи равна сумме показаний всех ваттметров:

$$P = P_1 + P_2 + P_3, \qquad (8.16)$$

где P_1, P_2, P_3 — показания каждого ваттметра, Вт.

Показание ваттметра определяют по отсчету (в делениях шкалы), умноженному на цену деления ваттметра.

Цена деления ваттметра

$$C_W = \frac{U_{ном} I_{ном}}{a_{max}}, \qquad (8.17)$$

где $U_{ном}$ — номинальное значение напряжения, В; $I_{ном}$ — номинальное значение тока, А; a_{max} — максимальное число делений ваттметра.

Измерение электрической энергии. Измерение электрической энергии однофазного переменного тока производят с помощью электрических счетчиков с индукционными измерительными механизмами:

$$W = CN, \qquad (8.18)$$

где W — энергия, действительно израсходованная в сети, кВт·ч; C — действительная постоянная счетчика; N — число оборотов диска счетчика.

Действительная постоянная счетчика — это количество энергии, которое прошло через счетчик за время одного оборота диска.

Энергия, учтенная счетчиком,

$$W' = C_{ном} N, \qquad (8.19)$$

где $C_{ном}$ — номинальная постоянная счетчика, т. е. количество энергии, учитываемое счетным механизмом за один оборот диска.

Для определения энергии, израсходованной за какой-то промежуток времени, необходимо из показания его в конце измерения вычесть показание, снятое в начале.

Зная постоянные C и $C_{ном}$, можно определить относительную погрешность счетчика:

$$\beta = (W' - W)/W = [(C_{ном} - C)/C]\,100\%. \qquad (8.20)$$

Поправочный коэффициент счетчика K — это отношение действительно израсходованной энергии к энергии, учтенной счетчиком:

$$K = W/W' = CN/(C_{ном} N) = C/C_{ном}. \qquad (8.21)$$

Для измерения энергии в трехфазных трех- и четырехпроводных цепях применяют однофазные, двухэлементные и трехэлементные счетчики энергии.

ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ С РЕШЕНИЯМИ

8.1. Вольтметр класса точности 1,0 с пределом измерения 300 В, имеющий максимальное число делений 150, поверен на отметках 30, 60, 100, 120 и 150 делений, при этом абсолютная погрешность в этих точках составила 1,8; 0,7; 2,5; 1,2 и 0,8 В. Определить, соответствует ли прибор указанному классу точности, и относительные погрешности на каждой отметке.

Р е ш е н и е. Вольтметр класса точности 1,0 с пределом измерения 300 В имеет наибольшую абсолютную погрешность 3 В. Так как значение абсолютной погрешности на всех поверяемых отметках менее 3 В, то прибор соответствует классу точности 1,0.

Относительные погрешности:

$$\beta = \frac{\Delta U}{U}\,100\%; \quad \beta_1 = \frac{1{,}8}{30 \cdot 2}\,100\% = 3\%;$$

$$\beta_2 = \frac{0,7}{60 \cdot 2} 100\% \approx 0,6\%; \quad \beta_3 = \frac{2,5}{100 \cdot 2} 100\% = 1,25\%;$$

$$\beta_4 = \frac{1,2}{120 \cdot 2} 100\% = 0,5\%; \quad \beta_5 = \frac{0,85}{150 \cdot 2} 100\% = 0,28 \approx 0,3\%.$$

8.2. Необходимо измерить ток потребителя в пределах 20—25 А. Имеется микроамперметр с пределом измерения 200 мкА, внутренним сопротивлением 300 Ом и максимальным числом делений 100. Определить сопротивление шунта для расширения предела измерения до 30 А и относительную погрешность измерения на отметке 85 делений, если класс точности прибора 1,0.

Решение. Необходимо вначале определить коэффициент шунтирования:

$$n = \frac{I}{I_A} = \frac{30}{200 \cdot 10^{-6}} = 15 \cdot 10^4.$$

Тогда

$$r_ш = \frac{r_A}{n-1} = \frac{300}{15 \cdot 10^{+4} - 1} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}.$$

Определяем показание амперметра, соответствующее 85 делениям, для чего цену деления 0,3 А/дел умножим на число делений 85, тогда прибор покажет $I = 25,5$ А.

Относительная погрешность в этой точке

$$\beta = \frac{\Delta I_{max}}{I} 100\% = \frac{0,3 \cdot 100}{25,5} = 1,18\% \approx 1,2\%,$$

где $\Delta I_{max} = 0,3$ А.

8.3. В сеть переменного тока через трансформатор тока 100/2,5 А и трансформатор напряжения 600/150 В включены амперметр, вольтметр и ваттметр, которые показали соответственно 100, 120 и 88 делений. Пределы измерения приборов следующие: амперметр — 3 А, вольтметр — 150 В, ваттметр — 2,5 А по току, 150 В по напряжению. Все приборы класса точности 0,5 имеют максимальное число делений 150. Определить полную потребляемую сетью мощность, ее полное сопротивление и коэффициент мощности, наибольшую абсолютную и относительную погрешности измерения полного сопротивления, учитывая класс точности приборов.

Решение. Определяем цену деления каждого прибора как отношение измерения к максимальному числу делений. Для амперметра цена деления 0,02 А/дел, для вольтметра — 1 В/дел, для ваттметра — 2,5 Вт/дел. Тогда показания приборов: $I = 0,02 \cdot 100 = 2$ А; $U = 1 \cdot 120 = 120$ В; $P = 2,5 \cdot 88 = 220$ Вт.

Коэффициенты трансформации $K_I = I_{1\,ном} / I_{2\,ном} = 100/2,5 = 40$, $K_U = U_{1\,ном} / U_{2\,ном} = 600/150 = 4$.

Ток, напряжение и активная мощность сети

$$I_c = K_I I = 40 \cdot 2 = 80 \text{ А},$$

$$U_c = K_U U = 4 \cdot 120 = 480 \text{ В},$$

$$P_c = K_I K_U P = 40 \cdot 4 \cdot 220 = 35,2 \text{ кВт}.$$

Полную мощность, потребляемую сетью, определяем через ток и напряжение:

$$S = U_c I_c = 480 \cdot 80 = 38,4 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Коэффициент мощности

$$\cos\varphi = P_c / S_c = 35,2/38,4 = 0,92.$$

Полное сопротивление сети

$$Z_c = 480/80 = 6 \text{ Ом}.$$

Наибольшее значение полного сопротивления

$$Z_{c\,max} = \frac{U_{c\,max}}{I_{c\,min}} = \frac{120,75 \cdot 4}{1,85 \cdot 40} = 6,53 \text{ Ом},$$

откуда абсолютная погрешность

$$\Delta Z_c = Z_{c\,max} - Z_c = 6,53 \text{ Ом} - 6 \text{ Ом} = 0,53 \text{ Ом}.$$

Относительная погрешность измерения

$$\beta = \frac{\Delta Z_c}{Z_c} 100\% = \frac{0,53}{6} 100\% = 8,85\%.$$

8.4. Методом амперметра и вольтметра измеряется сопротивление по схеме рис. 8.2, *а*. Показания амперметра и вольтметра следующие:

$U = 4,8$ В, $I = 0,15$ А. Приборы имеют класс точности 1,0 и пределы измерения $I_{пр} = 250$ мА, $U_{пр} = 7,5$ В. Определить измеряемое сопротивление, наибольшую абсолютную и относительную погрешности измерения.

Решение. Измеряемое сопротивление

$$R_x = U/I = 4{,}8/0{,}15 = 32 \text{ Ом}.$$

Наибольшая абсолютная погрешность вольтметра и амперметра соответственно с указанными пределами и классом точности 1,0

$$\Delta U_{max} = 1\% \, U_{пр} = 0{,}075 \text{ В},$$

$$\Delta I_{max} = 1\% \, I_{пр} = 2{,}5 \text{ мА} = 0{,}0025 \text{ А}.$$

Наибольшее значение измеряемого сопротивления с учетом класса точности применяемых приборов

$$R_{x\,max} = \frac{U + \Delta U_{max}}{I - \Delta I_{max}} = \frac{4{,}8 + 0{,}075}{0{,}15 - 0{,}0025} = 33{,}05 \text{ Ом}.$$

Тогда относительная погрешность измерения

$$\frac{R_{x\,max} - R_x}{R_x} 100\% = \frac{32 - 33{,}05}{32} 100\% = 3{,}28\%.$$

8.5. Паспортные данные счетчика электрической энергии: 220 В, 10 А, 1 кВт · ч — 640 оборотов диска. Определить относительную погрешность счетчика и поправочный коэффициент, если он был проверен при номинальных значениях тока и напряжения и за 10 мин сделал 236 оборотов.

Решение. Определяем номинальную и действительную постоянные счетчика:

$$C_{ном} = W_{ном}/N_{ном} = 1000 \cdot 3600/640 = 5625 \text{ Вт} \cdot \text{с/об},$$

$$C = \frac{UIt}{N_1} = \frac{220 \cdot 10 \cdot 600}{236} = 5600 \text{ Вт} \cdot \text{с/об}.$$

Поправочный коэффициент счетчика

$$K = C/C_{ном} = 5600/5625 = 0{,}995.$$

Относительная погрешность счетчика

$$\beta = \frac{C_{ном} - C}{C_{ном}} 100\% = \frac{5625 - 5600}{5625} 100\% = 0{,}444\%.$$

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

8.6. Определить для вольтметра с пределом измерения 30 В класса точности 0,5 относительную погрешность для точек 5, 10, 15, 20, 25 и 30 В и наибольшую абсолютную погрешность прибора.

8.7. Вольтметр с пределом измерения 7,5 В и максимальным числом делений 150 имеет наибольшую абсолютную погрешность 36 мВ. Определить класс точности прибора и относительную погрешность в точках 40, 80, 90, 100 и 120 делений.

8.8. Миллиамперметр с пределом измерения 300 мА и максимальным числом делений 150 был поверен в точках 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 и 150 делений. Образцовый прибор дал следующие показания (мА): 39,8; 80,1; 120,4; 159,7; 199,5; 240; 279,6; 300,3. Определить класс точности прибора и построить для него график поправок: $\Delta I = F(I_{пр})$.

8.9. Амперметр класса точности 1,5 имеет 100 делений. Цена каждого деления 0,5 А. Определить предел измерения прибора, наибольшую абсолютную погрешность и относительную погрешность в точках 10, 30, 50, 70 и 90 делений.

8.10. При поверке амперметра с пределом измерения 10 А класса точности 0,5 относительная погрешность на отметке 2 А составила 4,5%. Определить, соответствует ли прибор указанному классу точности, если абсолютная погрешность в этой точке имеет наибольшее значение.

8.11. Милливольтметр магнитоэлектрической системы класса точности 0,5 с пределами измерений 3; 1,5; 0,6; 0,3; 0,15 В имеет максимальное число делений 150. Определить для каждого предела наибольшее и наименьшее значения измеряемых напряжений в точке, соответствующей 40 делениям.

8.12. Определить класс точности микроамперметра с двусторонней шкалой и пределом измерения 100 мкА, если наибольшее значение абсолютной погрешности получено на отметке 40 мкА и равно 1,7 мкА. Определить относительную погрешность прибора для этого значения.

8.13. Предел измерения микроамперметра на 150 мкА должен быть расширен до 15 А. Определить сопротивление шунта, если его внутреннее сопротивление $r_A = 400$ Ом. Определить также класс точности прибора, если наибольшее значение абсолютной погрешности амперметра 100 мА.

8.14. Для расширения предела измерения амперметра с внутренним сопротивлением $r_A = 0{,}5$ Ом в 50 раз необходимо подключить шунт. Определить сопротивление шунта, ток полного отклонения

прибора и максимальное значение тока на расширенном пределе, если падение напряжения на шунте $U_ш = 75$ мВ.

8.15. Амперметр с внутренним сопротивлением $r_A = 0{,}015$ Ом и пределом измерения 20 А имеет шунт сопротивлением 0,005 Ом. Определить предел измерения амперметра с шунтом, а также ток в цепи, если его показание равно 12 А.

8.16. Магнитоэлектрический прибор с сопротивлением 10 Ом и током полного отклонения 7,5 мА может быть использован в качестве амперметра на 30 А. Определить сопротивление шунта.

8.17. Амперметр с наружным шунтом $r_ш = 0{,}005$ Ом рассчитан на предел измерения 60 А, его внутреннее сопротивление $r_A = 15$ Ом. Определить ток полного отклонения измерительной катушки прибора.

8.18. Амперметр класса точности 1,5 с пределом измерения 100 А имеет наружный шунт сопротивлением $r_ш = 0{,}001$ Ом. Определить сопротивление измерительной катушки прибора, если ток полного отклонения $I = 25$ мА. Определить также наибольшую абсолютную и относительную погрешности измерения следующих значений токов: 20, 30, 50, 75, 80 А. Определить наибольшую потребляемую амперметром мощность.

8.19. Милливольтметр с пределом измерения 75 мВ и внутренним сопротивлением $r_B = 25$ Ом имеет 150 делений шкалы. Определить сопротивление шунта, чтобы прибором можно было измерять предельное значение тока 30 А. Определить цену деления прибора в обоих случаях:

8.20. Имеется многопредельный амперметр. При шунтирующем множителе $n = 100$ амперметр имеет предел 2,5 А и падение напряжения на его зажимах при токе полного отклонения $U_{ном} = 75$ мВ. Определить сопротивления шунтов и пределы измерения прибора при следующих коэффициентах шунтирования: 200, 300, 1000, 2000, 3000, 4000 и 5000.

8.21. Микроамперметр с пределом измерения 1000 мкА и внутренним сопротивлением $r_A = 300$ Ом необходимо использовать в качестве вольтметра на предел 30 В. Определить добавочное сопротивление.

8.22. Милливольтметр с пределом измерения 750 мВ необходимо переделать в многопредельный вольтметр с пределами 7,5; 15; 75; 150 В. Добавочное

сопротивление на пределе 7,5 В составляет 1350 Ом. Определить добавочное сопротивление на каждом из пределов, сопротивление и ток полного отклонения прибора.

8.23. У вольтметра электродинамической системы с пределом измерения $U_1 = 300$ В и внутренним сопротивлением $r_B = 30$ кОм необходимо расширить предел до 1500 В. Определить добавочное сопротивление вольтметра и максимальную потребляемую мощность на основном и расширенном пределах.

8.24. Предел измерения вольтметра электромагнитной системы составляет 7,5 В при внутреннем сопротивлении $r_B = 200$ Ом. Определить добавочное сопротивление, которое необходимо включить для расширения предела измерения до 600 В.

8.25. Для измерения напряжения источника $U_{ист} = 350$ В использовали два последовательно включенных между собой вольтметра на пределы измерений 300 и 150 В и с внутренним сопротивлением соответственно 7 и 3 кОм. Определить показания приборов, максимальную абсолютную и относительную погрешности измерения, если приборы имеют класс точности 0,5.

8.26. Напряжение источника измеряется двумя последовательно включенными вольтметрами с пределами измерений 100 и 75 В и классами точности 1,0 и 1,5. Показания приборов следующие: $U_1 = 78$ В, $U_2 = 67$ В. Определить, соответствует ли измерение заданной точности 1,5%.

8.27. Определить сопротивление резистора $R_к$ (см. рис. 8.2, *а*) для двух случаев: а) без учета внутреннего сопротивления вольтметра; б) с учетом его. Показания вольтметра и амперметра при этом следующие: $U = 75$ В, $I = 2{,}5$ А. Внутреннее сопротивление вольтметра $r_B = 5$ кОм.

8.28. Сопротивление измеряется методом амперметра и вольтметра. Показания приборов при этом $U = 12$ В, $I = 0{,}25$ А. Пределы измерения и классы точности вольтметра и амперметра соответственно $U_{пр} = 15$ В, класс точности 0,5, $I_{пр} = 0{,}5$ А, класс точности 1,0. Определить измеряемое сопротивление и наибольшие абсолютную и относительную погрешности без учета сопротивления приборов.

8.29*. Необходимо измерить сопротивление методом амперметра и вольтметра с точностью 1,5%.

Какого класса точности необходимо взять амперметр (не хуже), чтобы произвести такое измерение? Показания приборов $U=48$ В, $I=0{,}4$ А. Вольтметр с пределом измерения $U_{пр}=75$ В класса точности 0,5; амперметр с пределом измерения $I_{пр}=0{,}5$ А.

8.30. Определить относительные погрешности в соответствии с данными табл. 8.1 при измерении сопротивлений по схемам рис. 8.2, *а, б* методом амперметра и вольтметра.

Таблица 8.1

Варианты	Сопротивление, Ом		
	r_A	$r_п$	R_x
1	0,001	2000	0,2
2	0,01	7500	5
3	0,1	100000	200
4	1,0	25000	100
5	0,01	50000	40

8.31. Для измерения сопротивления использован вольтметр с внутренним сопротивлением $r_В=50$ кОм. При последовательном его включении с измеряемым сопротивлением прибор показал 120 В, а при его подключении без сопротивления — 162 В. Определить сопротивление и наибольшие абсолютную и относительную погрешности измерения, если вольтметр имеет предел измерения 300 В и класс точности 2,5. Какого класса точности надо выбрать вольтметр для обеспечения точности 10%?

8.32. Для определения полного, активного и реактивного сопротивлений катушки собрана схема (рис. 8.5). Показания приборов следующие: $U_1=71{,}5$ В, $U_2=25$ В, $U_3=63{,}5$ В, $I=2{,}5$ А. Определить указанные сопротивления и наибольшее значение относительной погрешности измерения $R1$ и $Z_к$, если класс точности всех приборов 1,0 и пределы измерений следующие: $U_{пр\,1}=U_{пр\,3}=100$ В, $U_{пр\,2}=30$ В, $I_{пр}=3$ А.

8.33*. При определении активного и индуктивного сопротивлений катушки в цепь переменного тока включают амперметр, вольтметр и ваттметр, которые показали следующие значения: 1,5 А — амперметр с пределом измерения 3 А; 12 В — вольтметр с пределом 50 В; 9 Вт — ваттметр с пределом 30 Вт. Класс точности всех приборов 0,5. Определить наибольшее и наименьшее значения определяемых сопротивлений с учетом класса точности всех

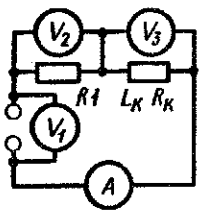

Рис. 8.5

приборов и относительную погрешность измерения этих величин.

8.34. Мостом постоянного тока производят измерения сопротивления резистора (см. рис. 8.3). Получены следующие значения сопротивлений плеч моста при его уравновешивании: $R1=136$ Ом, $R2=1000$ Ом, $R3=100$ Ом. Определить измеряемое сопротивление и наибольшую абсолютную погрешность измерения, если класс точности моста 1,0.

8.35. Определить активное сопротивление индуктивной катушки, измеренное на постоянном токе мостовым методом. При этом значения сопротивлений оказались следующие (см. рис. 8.3): $R1=26{,}387$ Ом, $R2=100$ Ом, $R3=10$ Ом. Как изменится сопротивление плеча $R1$, если выбрать: а) $R2=R3=100$ Ом; б) $R2=R3=10$ Ом; в) $R2=1000$ Ом; $R3=10$ Ом; г) $R2=10$ Ом, $R3=100$ Ом? Какое из измерений дает наиболее точный результат, если $R1$ может изменяться до 1000 Ом, наименьшая его декада $0{,}001\times10$ Ом?

8.36. С помощью моста постоянного тока, представленного на рис. 8.6, определяют место короткого замыкания в линии. Мост уравновешен при следующих значениях сопротивлений: $R1=238{,}4$ Ом, $R3=10$ Ом, $R2=1000$ Ом. Сопротивление 1 м кабеля 0,005 Ом.

8.37. Для разбраковки резисторов R_x с номинальным сопротивлением 1000 Ом на четыре группы в соответствии с отклонением от номинала на $+5$; -5; $+1$; -1% составлен мост, представленный на рис. 8.7. Значения сопротивлений $R3=R4=1000$ Ом. Определить значения сопротивлений $R2$, $R5$, $R6$, $R7$ и $R8$.

Примечание. При отклонении измеряемого сопротивления на -1 и -5% от номинального

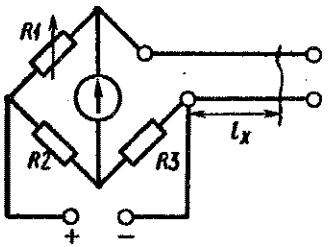

Рис. 8.6

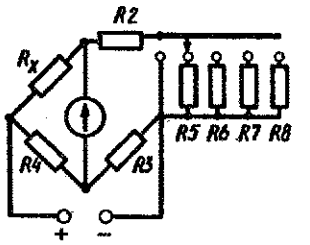

Рис. 8.7

подвижная система гальванометра отклоняется влево, при отклонении от номинального значения сопротивления на +1 и +5% гальванометр дает отклонение вправо. Гальванометр отградуирован в процентах.

8.38. В трехфазную сеть с действующим значением линейного напряжения 380 В подключен трехфазный асинхронный двигатель. Определить потребляемую двигателем активную мощность и коэффициент мощности в режиме холостого хода и под нагрузкой, если показания ваттметра и амперметра, включенных в одну из фаз двигателя, для указанных режимов следующие: $P_х = 20$ Вт, $I_х = 0{,}3$ А, $P_н = 154$ Вт, $I_н = 1$ А.

8.39*. Активная мощность трехфазной симметричной нагрузки, включенной по схеме «звезда», измеряется по методу двух ваттметров. Действующее значение линейного напряжения $U_л = 220$ В. Полное сопротивление каждой фазы $Z = 120$ Ом. Определить показание второго ваттметра при нулевом показании первого.

8.40. Как изменятся показания ваттметров (задача 8.39), если нагрузка: а) чисто активная; б) чисто реактивная?

8.41. В трехфазной четырехпроводной цепи с действующим значением линейного напряжения $U_л = 220$ В и коэффициентом мощности нагрузки в каждой фазе 0,7 показания ваттметров в фазах A, B и C равны 210, 320 и 375 Вт. Определить полную, активную и реактивную мощности, потребляемые нагрузкой, а также полное, активное и реактивное сопротивления нагрузки в каждой фазе.

8.42. Методом амперметра и вольтметра в схемах рис. 8.2, *а, б* с заданными значениями (см. табл. 8.1) измерена мощность цепи. Определить относительную погрешность метода, обусловленную: а) сопротивлением приборов (см. табл. 8.1); б) классом точности приборов, если показания амперметра и вольтметра составляют 0,7 от предела измерения, а класс точности приборов 0,5.

8.43. Через трансформатор тока 50/5 А и трансформатор напряжения 3000/150 В в однофазную цепь переменного тока включен ваттметр электродинамической системы с пределами измерений $I_{пр} = 5$ А, $U_{пр} = 150$ В. Определить активную мощность цепи и наибольшую относительную погрешность измерения, если ваттметр показал 125 делений. Класс

точности прибора 0,5, максимальное число делений 150. (Классом точности измерительных трансформаторов пренебречь.)

8.44. Амперметр, вольтметр и ваттметр подключены к нагрузке через трансформаторы тока 150/5 А и напряжения 1000/100 В. Показания приборов при этом были следующие: $I = 2{,}4$ А, $U = 78$ В и $P = 165$ Вт. Определить ток, напряжение и мощность нагрузки (полную, активную, реактивную) и $\cos\varphi$.

8.45*. В сети однофазного тока, находящейся под напряжением 1500 В, проходит ток 140 А. Для измерения этих значений, потребляемой активной мощности и $\cos\varphi$ использовали вольтметр с пределом измерения 75 В, амперметр на 5 А и ваттметр с пределами по току и напряжению соответственно 5 А и 75 В, с числом делений 150. Приборы имеют класс точности 0,5 и включены в сеть через трансформаторы тока и напряжения с коэффициентами трансформации $K_{I\,ном} = 40$ при $I_{2\,ном} = 5$ А и $K_{U\,ном} = 30$ при $U_{2\,ном} = 100$ В. Определить показания амперметра и вольтметра, а также потребляемую активную мощность и $\cos\varphi$, если ваттметр показал 90 делений. Найти относительные погрешности измерения этих величин, определяемые классом точности приборов.

8.46. Определить полное, активное и реактивное сопротивления и мощности цепи переменного тока, если амперметр, вольтметр и ваттметр, включенные через трансформаторы тока и напряжения, с коэффициентами трансформации $K_{I\,ном} = 50$ и $K_{U\,ном} = 40$ при $I_{2\,ном} = 5$ А и $U_{2\,ном} = 100$ В показали следующие значения: $I = 4{,}2$ А, $U = 90$ В, $P = 240$ Вт.

8.47. Счетчик электрической энергии имеет паспортные данные: 120 В, 10 А, 1 кВт·ч — 625 оборотов диска. Определить номинальную постоянную счетчика и мощность нагрузки, если его диск сделал за 10 мин 450 оборотов.

8.48. Определить номинальную $C_{ном}$ и действительную C постоянные счетчика электрической энергии, его относительную погрешность и поправочный коэффициент, если паспортные данные счетчика: 220 В, 5 А, 50 Гц, 1 кВт·ч — 1280 оборотов диска. Счетчик проверен при напряжении 220 В и токе 5 А и сделал 150 оборотов за 6 мин.

8.49. Счетчик электрической энергии, включенный в цепь переменного тока напряжением 220 В

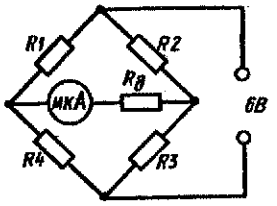

Рис. 8.8

и частотой 50 Гц, сделал 11 600 оборотов за 15 ч. Определить ток нагрузки при условии, что нагрузка постоянна, а $C_н = 4800$ Вт·с/об.

8.50*. Для измерения температуры в нагревателе собрана мостовая схема (рис. 8.8) с сопротивлениями плеч $R1 = R2 = 200$ Ом и $R3 = 25$ Ом. Медный датчик включен в четвертое плечо моста и имеет сопротивление 25 Ом при 20 °С. Определить добавочное сопротивление, включаемое в измерительную диагональ моста последовательно с микроамперметром на 100 мкА и внутренним сопротивлением 750 Ом, для измерения температуры в пределах 20—320 °С при питании моста $U_{вх} = 6$ В. Определить цену деления прибора в градусах, если он имеет 50 делений.

8.51*. Термопара хромель-алюмель с термо-ЭДС 42,7 мкВ/град подключена к прибору магнитоэлектрической системы, имеющему 100 делений, с током полного отклонения 150 мкА и сопротивлением 200 Ом. Определить предельную разность температур горячего и холодного спаев, предельную температуру измерения и цену деления прибора, если сопротивление термопары и подводящих проводов 13,5 Ом, а температура холодного спая 20 °С.

КАЧЕСТВЕННЫЕ ЗАДАЧИ

8.52. Вольтметры разных систем на один и тот же предел измерения U имеют следующие классы точности: 1,0; 2,5; 0,5; 0,2. Определить наибольшую абсолютную погрешность для каждого прибора в общем виде.

8.53. Вольтметр с пределом измерения $U_{пр}$ и внутренним сопротивлением $r_В$ должен работать на расширенном пределе $5U_{пр}$. Определить добавочное сопротивление.

8.54. Предел измерения $I_{пр}$ амперметра с внутренним сопротивлением r_A должен быть расширен до значения $\delta I_{пр}$. Найти значение $r_ш$.

8.55. Представить схему измерения резистора сопротивлением 1 Ом методом амперметра и вольтметра.

8.56. Как измерить то же сопротивление с помощью моста постоянного тока?

8.57. Какими способами можно измерить сопротивление 100 Ом? Нарисовать схемы измерения.

8.58. Ваттметр, включенный в фазу трехфазной цепи с равномерной нагрузкой, показал P (Вт). Чему равна активная мощность нагрузки?

8.59. В трехфазную трехпроводную цепь включены два ваттметра. Оба прибора дали одинаковые показания. Указать, равномерная или неравномерная нагрузка и каков ее характер.

8.60. Коэффициент мощности нагрузки трехфазной трехпроводной цепи $\cos\varphi = 0{,}5$. Мощность измеряется с помощью двух ваттметров. Что покажут оба прибора и какова активная мощность всей цепи?

8.61. Мощность трехфазной трехпроводной цепи определяется с помощью двух ваттметров. Как определится мощность, потребляемая всей цепью, при $\cos\varphi < 0{,}5$?

8.62. В трехфазную четырехпроводную цепь включены три ваттметра, давшие следующие показания (Вт): $P_1 = P$, $P_2 = -0{,}8P$, $P_3 = 2P_2$. Определить потребляемую цепью мощность.

8.63. Счетчик электрической энергии показал W (кВт·ч) за 5 ч. Определить мощность, потребляемую цепью.

8.64. Поправочный коэффициент счетчика электрической энергии $K = 0{,}8$, его показание равно W (кВт·ч). Определить действительное значение израсходованной в сети энергии.

Глава 9
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ И УРАВНЕНИЯ

Электродвижущая сила обмоток якоря машины постоянного тока

$$E = c_E \Phi n = \frac{pN}{60a} \Phi n, \qquad (9.1)$$

где c_E — электрическая постоянная, зависящая от конструктивных данных машины; Ф — магнитный

поток, Вб; n — частота вращения якоря, об/мин; p — число пар полюсов машины; N — число активных проводников обмотки якоря; a — число пар параллельных ветвей обмотки якоря.

Напряжение на зажимах генератора

$$U = E - I_я R_я. \tag{9.2}$$

Напряжение на зажимах двигателя

$$U = E + I_я R_я, \tag{9.3}$$

где E — ЭДС обмоток якоря, В; $I_я$ — ток якоря, А; $R_я$ — сопротивление цепи якоря, Ом.

Полезная мощность, отдаваемая генератором,

$$P_2 = UI. \tag{9.4}$$

Мощность, подводимая к двигателю,

$$P_1 = UI, \tag{9.5}$$

где U — напряжение на зажимах, В; I — ток внешней цепи, А.

Электромагнитная мощность

$$P_{эм} = EI_я. \tag{9.6}$$

Ток якоря в генераторах с самовозбуждением

$$I_я = I + I_в. \tag{9.7}$$

Ток двигателя с параллельной обмоткой возбуждения

$$I = I_я + I_в, \tag{9.8}$$

где $I_В$ — ток в обмотке возбуждения, А.

Ток якоря двигателя

$$I_я = \frac{U - E}{R_я} = \frac{U - c_E \Phi n}{R_я}. \tag{9.9}$$

Ток в цепи возбуждения двигателя

$$I = \frac{U}{R_{во}} = \frac{U}{R_в + R_р}, \tag{9.10}$$

где $R_{во}$ — общее сопротивление цепи возбуждения, Ом; $R_в$ — сопротивление обмотки возбуждения, Ом; $R_р$ — сопротивление реостата в цепи возбуждения, Ом.

Сопротивление пускового реостата

$$R_р = \frac{U}{I_{я\,ном}} - R_я, \tag{9.11}$$

где $I_{я.ном}$ — номинальный ток якоря, А.

Частота вращения якоря двигателя

$$n = \frac{E_я}{c_E \Phi} = \frac{U - IR_я}{c_E \Phi}. \tag{9.12}$$

Частота вращения идеального холостого хода двигателя

$$n_х = n_{ном} \frac{U_{ном}}{U_{ном} - I_{я\,ном} R_я}. \tag{9.13}$$

Уравнение механической характеристики двигателя

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{MR_я}{c_E c_M \Phi^2}, \tag{9.14}$$

где M — вращающий момент, развиваемый двигателем, Н·м; c_M — постоянная двигателя, обусловливающая момент двигателя.

Вращающий момент двигателя

$$M = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_я = c_M \Phi I_я, \tag{9.15}$$

$$M = 9{,}55 P_2 / n, \tag{9.16}$$

где P_2 — мощность на валу двигателя, Вт.

Связь между постоянными машины

$$c_M = 9{,}55 c_E. \tag{9.17}$$

Уравнение моментов генератора

$$M_г = M_х + M_{эм} = M_х + c_M \Phi I_я, \tag{9.18}$$

где $M_х$ — момент холостого хода, Н·м; $M_{эм}$ — электромагнитный тормозной момент, Н·м.

Уравнение моментов двигателя

$$M = c_E \Phi I_я = M_х + M_2 + M_{дин}, \tag{9.19}$$

где M_2 — полезный противодействующий момент механизма, Н·м; $M_{дин}$ — динамический момент, Н·м.

Кратность по току

$$K_I = I_п / I_{ном}, \tag{9.20}$$

где $I_п$ — пусковой ток двигателя, А; $I_{ном}$ — номинальный ток двигателя, А.

Кратность по моменту

$$K_M = M_п / M_{ном}, \quad (9.21)$$

где $M_п$ — пусковой момент двигателя, Н·м, $M_{ном}$ — номинальный момент двигателя, Н·м.

КПД генератора

$$\eta = \frac{P_{2г}}{P_1} = \frac{P_{2г}}{P_{2г}+\Sigma P} = \frac{UI}{UI+\Sigma P} = 1 - \frac{\Sigma P}{UI+\Sigma P}, \quad (9.22)$$

где $P_{2г}$ — мощность на зажимах генератора, Вт; P_1 — подводимая механическая мощность, Вт; U — напряжение на зажимах генератора, В; I — ток нагрузки, А.

КПД двигателя

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Sigma P}{P_1} = \frac{UI - \Sigma P}{UI} = 1 - \frac{\Sigma P}{UI}, \quad (9.23)$$

где P_2 — мощность на валу двигателя, Вт; P_1 — подводимая мощность, Вт; ΣP — сумма потерь, Вт.

Сумму потерь определяют по формуле

$$\Sigma P = P_х + P_э = P_м + P_{мх} + P_{эв} + P_{эя} + P_{эщ} + P_д, \quad (9.24)$$

где $P_х$ — потери при холостом ходе, Вт; $P_э$, $P_м$ — электрические и магнитные потери, Вт; $P_{мх}$ — механические потери, Вт; $P_{эв}$ — потери в обмотках возбуждения, включая регулировочный реостат, Вт; $P_{эя}$ — потери в обмотках якоря, Вт; $P_{эщ}$ — потери электрические в щетках, Вт; $P_д$ — потери добавочные, Вт (под добавочными потерями понимают трудно учитываемые потери и принимают их равными 1% от подводимой мощности двигателя).

Максимальное значение КПД возникает при условии равенства потерь при холостом ходе (постоянных) потерям электрическим (переменным):

$$P_х = P_э, \text{ или } I^2_{ном}\Sigma R = P_х + I_в U_в. \quad (9.25)$$

Ток нагрузки, соответствующий максимальному КПД,

$$I = \sqrt{\frac{P_х + I_в U_в}{R_я}}, \quad (9.26)$$

где $U_в$ — напряжение на обмотке возбуждения, В.

ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ С РЕШЕНИЯМИ

9.1. Генератор постоянного тока П51 с параллельным возбуждением имеет следующие паспортные данные: мощность $P_{ном} = 5$ кВт, напряжение $U_{ном} = 230$ В, частота вращения $n_{ном} = 1450$ об/мин, сопротивление цепи якоря $R_я = 0{,}635$ Ом, сопротивление обмотки возбуждения $R_в = 91$ Ом, магнитные и механические потери $P_х = 0{,}052$ от номинальной мощности. Определить номинальный ток обмотки якоря, ЭДС обмотки якоря при номинальном режиме, потери электрические, сумму потерь, потребляемую (механическую) мощность, КПД при номинальном режиме работы.

Решение. Для определения номинального тока якоря найдем номинальный ток генератора и ток обмотки возбуждения.

Номинальный ток генератора определяем из соотношения

$$P_{ном} = U_{ном} I_{ном},$$

откуда

$$I_{ном} = P_{ном} / U_{ном} = 5000/230 = 21{,}74 \text{ А}.$$

Ток обмотки возбуждения

$$I_в = U_{ном} / R_в = 230/91 = 2{,}52 \text{ А}.$$

Ток цепи якоря в соответствии с законом Кирхгофа равен сумме токов в цепи нагрузки и обмотки возбуждения:

$$I_я = I_{ном} + I_в = 21{,}74 + 2{,}52 = 24{,}26 \text{ А}.$$

ЭДС обмотки якоря при номинальном режиме

$$E = U_{ном} + I_я R_я = 230 + 24{,}26 \cdot 0{,}635 = 245{,}4 \text{ В}.$$

Электрические потери в обмотках:
якоря

$$P_я = I^2_я R_я = 24{,}26^2 \cdot 0{,}635 = 373{,}7 \text{ Вт};$$

возбуждения

$$P_в = I^2_в R_в = 2{,}52^2 \cdot 91 = 577{,}8 \text{ Вт}.$$

Магнитные и механические потери

$$P_м + P_{мх} = 0{,}052 P_{ном} = 0{,}052 \cdot 5000 = 260 \text{ Вт}.$$

Сумма потерь при номинальном режиме

$$\Sigma P = P_я + P_в + P_{мх} = 373{,}7 + 577{,}8 + 260 = 1211{,}5 \text{ Вт}.$$

Потребляемая мощность

$$P_1 = P_{ном} + \Sigma P = 5000 + 1211{,}5 = 6211{,}5 \text{ Вт}.$$

КПД при номинальном режиме

$$\eta = P_{ном}/P_1 = 5000/6211{,}5 = 0{,}805.$$

9.2. Генератор постоянного тока с параллельным возбуждением имеет следующие паспортные данные: число пар полюсов $p=2$, число витков якоря $w=124$, число пар параллельных ветвей $a=2$, сопротивление обмотки якоря $R_я=0{,}04$ Ом, ток обмотки возбуждения $I_в=2{,}0$ А, частота вращения $n_{ном}=2850$ об/мин, ЭДС в номинальном режиме $E_{ном}=234{,}4$ В, номинальный ток $I_{ном}=108$ А, КПД $\eta=89\%$.

Определить мощности электромагнитную, потребляемую и на выводах генератора, сумму потерь, потери электрические, добавочные, механические и магнитные, напряжение при холостом ходе генератора.

Решение. Для определения электромагнитной мощности найдем постоянные двигателя, магнитный поток и электромагнитный тормозной момент.

Определяем электрическую и магнитную постоянные машины:

$$c_E = \frac{pN}{60a} = \frac{p(2w)}{60a} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 124}{60 \cdot 2} = 4{,}13;$$

$$c_M = c_E 9{,}55 = 4{,}13 \cdot 9{,}55 = 39{,}47.$$

Магнитный поток генератора определяем из формулы для ЭДС обмоток якоря:

$$E_я = c_E \Phi n,$$

откуда

$$\Phi = E_{ном}/(c_E n) = 234{,}43/(4{,}13 \cdot 2850) = 0{,}02 \text{ Вб}.$$

Ток в цепи якоря

$$I_я = I_{ном} + I_в = 108{,}7 + 2 = 110{,}7 \text{ А}.$$

Электромагнитная мощность

$$P_{эм} = E_я I_я = 234{,}4 \cdot 110{,}7 = 25951 \text{ Вт}.$$

Напряжение на зажимах генератора при номинальном режиме

$$U_{ном} = E_я - I_я R_я = 234{,}4 - 110{,}7 \cdot 0{,}04 = 230 \text{ В}.$$

Мощность на выходе генератора при номинальном режиме

$$P_{ном} = U_{ном} I_{ном} = 230 \cdot 108{,}7 = 25\,000 \text{ Вт}.$$

Мощность, потребляемая генератором,

$$P_1 = P_{ном}\eta = 25\,000/0{,}89 = 28\,090 \text{ Вт}.$$

Сумма потерь при номинальной нагрузке

$$\Sigma P = P_1 - P_{ном} = 28\,090 - 25\,000 = 3090 \text{ Вт}.$$

Электрические потери в обмотках якоря и возбуждения

$$P_э = P_{эл} + P_{эв} = I_я^2 R_я + I_в U_{ном} =$$
$$= 108{,}7^2 \cdot 0{,}04 + 2 \cdot 230 = 932 \text{ Вт}.$$

Добавочные потери в соответствии с ГОСТом составляют 1% от номинальной мощности генератора:

$$P_д = 0{,}01 P_{ном} = 0{,}01 \cdot 25\,000 = 250 \text{ Вт}.$$

Механические и магнитные потери

$$P_м + P_{мх} = \Sigma P - (P_э + P_д) = 3090 - (932 + 250) = 2808 \text{ Вт}.$$

Напряжение при холостом ходе генератора

$$U_{хх} = E - I_я R_я = 234{,}4 - 2 \cdot 0{,}04 = 234{,}32 \text{ В},$$

так как нагрузочный ток представляет собой ток обмотки возбуждения.

9.3. Двухполюсный генератор постоянного тока с параллельным возбуждением имеет сопротивление цепи якоря $R_я=0{,}155$ Ом, одну пару параллельных ветвей, $N=500$ активных проводников, магнитный поток $\Phi=1{,}97 \cdot 10^{-2}$ Вб, частоту вращения якоря $n_{ном}=1450$ об/мин. При номинальном токе в цепи нагрузки $I_{ном}=50$ А и токе возбуждения $I=1{,}7$ А КПД $\eta=0{,}89$.

Определить напряжение на зажимах генератора при номинальной нагрузке, электромагнитный момент, подводимую к генератору мощность при номинальной нагрузке и сумму потерь.

Решение. ЭДС, индуцируемая в обмотке якоря, при номинальной частоте вращения

$$E = c_E \Phi n_{ном} = \frac{pN}{60a} \Phi n_{ном} = \frac{1 \cdot 500 \cdot 0{,}0197 \cdot 1450}{60 \cdot 1} = 238 \text{ В}.$$

Ток в цепи якоря

$$I_я = I_{ном} + I_в = 50 + 1{,}7 = 51{,}7 \text{ А}.$$

Напряжение на зажимах генератора при номинальной нагрузке

$$U = E - I_я R_я = 238 - 51{,}7 \cdot 0{,}14 = 230 \text{ В}.$$

Электромагнитный тормозной момент

$$M = c_м \Phi I_я = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_я = \frac{1 \cdot 500 \cdot 0{,}0197 \cdot 51{,}7}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 1} = 81 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Полезная мощность, отдаваемая генератором в цепь,

$$P_{2\,ном} = U_{ном} I_{ном} = 230 \cdot 50 = 11\,500 \text{ Вт}.$$

Мощность, подводимая к генератору для его вращения, при номинальной нагрузке

$$P_{1\,ном} = P_{2\,ном} \eta = 11\,500 / 0{,}85 = 13\,529 \text{ Вт}.$$

Сумма потерь при номинальной нагрузке

$$\Sigma P = P_{1\,ном} - P_{2\,ном} = 13\,529 - 11\,500 = 2029 \text{ Вт}.$$

9.4. Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением подключен к сети с напряжением $U = 110$ В и потребляет ток $I_{ном} = 50{,}5$ А. Сопротивление обмотки якоря и добавочных полюсов $R_я = 0{,}21$ Ом, сопротивление обмотки возбуждения $R_в = 62$ Ом, номинальная частота вращения $n_{ном} = 1000$ об/мин, КПД $\eta = 81\%$. Определить сумму потерь, потери электрические, дополнительные, механические и магнитные, ток при максимальном КПД, максимальный КПД.

Решение. Мощность, потребляемая двигателем при номинальной нагрузке,

$$P_1 = U_{ном} I_{ном} = 110 \cdot 50{,}5 = 5555 \text{ Вт}.$$

Номинальная мощность на валу двигателя

$$P_{ном} = \eta P_1 = 0{,}81 \cdot 5555 \approx 4500 \text{ Вт}.$$

Сумма потерь при номинальной нагрузке

$$\Sigma P = P_1 - P_{ном} = 5555 - 4500 = 1055 \text{ Вт}.$$

Ток обмотки возбуждения

$$I_в = U_{ном} / R_в = 110 / 62 = 1{,}77 \text{ А}.$$

Ток в обмотке якоря

$$I_я = I_{ном} - I_в = 50{,}5 - 1{,}77 = 48{,}73 \text{ А}.$$

Электрические потери в цепи якоря и обмотке возбуждения при номинальной нагрузке

$$P_э = P_{эя} + P_{эв} = I_я^2 R_я + I_в^2 R_в =$$
$$= 48{,}73^2 \cdot 0{,}21 + 1{,}77^2 \cdot 62 = 693 \text{ Вт}.$$

Добавочные потери составляют 1% от номинальной мощности:

$$P_д = 0{,}01 P_{ном} = 0{,}01 \cdot 4500 = 45 \text{ Вт}.$$

Механические и магнитные потери

$$P_{мх} + P_м = \Sigma P - (P_э + P_д) = 1055 - (693 + 45) = 317 \text{ Вт}.$$

Условием максимального КПД является равенство постоянных и переменных потерь, т. е.

$$I_1^2 R_я = P_х + I_в^2 R_в,$$

откуда ток в цепи нагрузки при максимальном КПД

$$I_1 = \sqrt{\frac{P_х + I_в^2 R_в}{R_я}} = \sqrt{\frac{317 + 45 + 1{,}77^2 \cdot 62}{0{,}21}} = 51{,}5 \text{ А}.$$

Максимальный КПД

$$\eta_{max} = 1 - \frac{\Sigma P}{U(I_1 + I_в)} = 1 - \frac{2 \cdot 317 + 45}{110(51{,}5 + 1{,}77)} = 0{,}884.$$

9.5. Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением имеет следующие паспортные данные: напряжение $U_{ном} = 220$ В, ток $I_{ном} = 43$ А, частота вращения $n_{ном} = 1000$ об/мин, номинальный ток возбуждения $I_в = 1{,}5$ А, сопротивление цепи якоря $R_я = 0{,}03$ Ом. Определить частоту вращения якоря, если напряжение, подведенное к обмотке якоря, понизится до 200 В, а вращающий момент на валу двигателя и ток возбуждения при этом останутся неизменными.

Решение. Ток в цепи якоря при номинальной мощности

$$I_я = I_{ном} - I_в = 43 - 1{,}5 = 41{,}5 \text{ А}.$$

Вращающий момент при номинальной мощности и номинальном напряжении $U_{ном} = 220$ В

$$M_{ном} = c_M \Phi I_я.$$

Вращающий момент при пониженном напряжении

$$M_1 = c_M \Phi_1 I_{1я}.$$

Так как по условию вращающие моменты и токи возбуждения постоянны, то и магнитные потоки равны между собой; следовательно, ток якоря в обоих случаях

$$I_я = I_{я1} = 41{,}5 \text{ А}.$$

Частота вращения якоря при номинальном напряжении $U_{ном} = 220$ В

$$n_{ном} = (U_{ном} - R_я I_{ном})/(c_E \Phi).$$

Частота вращения двигателя при напряжении $U = 200$ В

$$n_1 = (U_1 - R_я I_{я1})/(c_E \Phi_1).$$

Разделив одно уравнение на другое, получим

$$\frac{n_1}{n_{ном}} = \frac{U_1 - R_я I_{1я}}{U_{ном} - R_я I_я},$$

откуда

$$n_1 = n_{ном} \frac{U_1 - R_я I_{1я}}{U_{ном} - R_я I_я} = 1000 \frac{200 \cdot 0{,}3 \cdot 41{,}5}{220 - 0{,}3 \cdot 41{,}5} = 903 \text{ об/мин}.$$

9.6. Четырехполюсный двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением работает от сети с напряжением $U = 220$ В и потребляет ток $I_{ном} = 102$ А. Число проводников в обмотке якоря $N = 600$, число пар параллельных ветвей $a = 2$, магнитный поток $\Phi = 1{,}4 \cdot 10^{-2}$ Вб, сопротивление обмотки якоря $P_я = 0{,}1$ Ом, ток обмотки возбуждения $I_в = 2$ А.

Определить ЭДС обмоток якоря, номинальную частоту вращения, номинальный вращающий момент, КПД, сопротивление пускового реостата при пусковом токе $I_п = 3I_{ном}$, пусковой ток при отсутствии пускового реостата.

Решение. Для определения ЭДС обмоток якоря необходимо найти ток якоря. Для двигателей постоянного тока его определяют по формуле

$$I_я = I_{ном} - I_в = 102 - 2 = 100 \text{ А},$$

откуда ЭДС обмотки якоря в номинальном режиме

$$E_я = U_{ном} - I_я R_я = 220 - 100 \cdot 0{,}1 = 210 \text{ В}.$$

Номинальная частота вращения якоря

$$n_{ном} = \frac{E}{c_E \Phi} = \frac{E}{\frac{pN\Phi}{60a}} = \frac{210}{\frac{2 \cdot 600 \cdot 1{,}4 \cdot 10^{-2}}{60 \cdot 2}} = 1500 \text{ об/мин}.$$

Номинальный вращающий момент

$$M_{ном} = c_M \Phi I_я = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_я =$$

$$= \frac{2 \cdot 600}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 2} 1{,}4 \cdot 10^{-2} \cdot 100 = 133{,}75 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Номинальную мощность на валу двигателя можно определить из уравнения (9.16):

$$M_{ном} = 9{,}55 \frac{P_{ном}}{n_{ном}},$$

откуда

$$P_{ном} = \frac{M_{ном} n_{ном}}{9{,}55} = \frac{133{,}75 \cdot 1500}{9{,}55} = 21\,000 \text{ Вт}.$$

Потребляемая мощность

$$P_1 = U_{ном} I_{ном} = 220 \cdot 102 = 22\,440 \text{ Вт}.$$

КПД при номинальной нагрузке

$$\eta = P_{ном}/P_1 = 21\,000/22\,440 = 0{,}935.$$

Сопротивление пускового реостата при условии понижения пускового тока до трехкратного значения номинального тока находим из уравнения

$$I_я = U_{ном}/(R_я + R_р),$$

откуда

$$R_р = \frac{U_{ном}}{3I_{ном}} - R_я = \frac{220}{3 \cdot 100} - 0{,}1 = 0{,}63 \text{ Ом}.$$

Пусковой ток при отсутствии пускового реостата

$$I_{\text{яп}} = U_{\text{ном}} / R_{\text{я}} = 220/0{,}1 = 2200 \text{ А}.$$

9.7. На табличке-паспорте двигателя постоянного тока указаны следующие паспортные данные: тип двигателя П22, номинальный режим работы — продолжительный, номинальная мощность $P_{\text{ном}} = 1$ кВт, номинальное напряжение $U_{\text{ном}} = 110$ В, номинальная частота вращения $n_{\text{ном}} = 1500$ об/мин, система возбуждения — параллельная, КПД $\eta = 76\%$. Кроме того, известно сопротивление цепи обмотки якоря $R_{\text{я}} = 0{,}88$ Ом и обмотки возбуждения $R_{\text{в}} = 166$ Ом.

Определить номинальный вращающий момент, мощность, потребляемую двигателем из сети, потребляемый ток, ток в обмотках якоря и возбуждения, ток в обмотке якоря при коротком замыкании (при пуске), пусковой ток и сопротивление пускового реостата при условии $I_{\text{п}} = 2{,}5 I_{\text{ном}}$, потери при холостом ходе и ток двигателя при холостом ходе.

Решение. Номинальный вращающий момент

$$M_{\text{ном}} = 9{,}55 \frac{P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} = \frac{9{,}55 \cdot 1000}{1500} = 6{,}36 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Потребляемая мощность из сети номинальной нагрузки

$$P_1 = \frac{P_{\text{ном}}}{\eta} = \frac{1000}{0{,}76} = 1315 \text{ Вт}.$$

Потребляемый ток при номинальном режиме

$$I_{\text{ном}} = P_1 / U_{\text{ном}} = 1315/110 = 12 \text{ А}.$$

Ток обмотки возбуждения

$$I_{\text{в}} = U_{\text{ном}} / R_{\text{в}} = 110/166 = 0{,}66 \text{ А}.$$

Ток якоря при номинальном моменте на валу двигателя

$$I_{\text{я}} = I_{\text{ном}} - I_{\text{в}} = 12 - 0{,}66 = 11{,}34 \text{ А}.$$

Ток якоря при коротком замыкании (при отключенной обмотке возбуждения или в момент пуска при отключенном пусковом реостате)

$$I_{\text{к}} = U_{\text{ном}} / R_{\text{я}} = 110/0{.}88 = 125 \text{ А}.$$

Пусковой ток при условии $I_{\text{п}} = 2{,}5 I_{\text{ном}}$

$$I_{\text{п}} = 2{,}5 I_{\text{ном}} = 2{,}5 \cdot 12 = 30 \text{ А}.$$

Сопротивление пускового реостата при условии $I_{\text{п}} = 2{,}5 I_{\text{ном}}$

$$R_{\text{п}} = U_{\text{ном}} / I_{\text{п}} - R_{\text{я}} = 110/30 - 0{,}88 = 2{,}78 \text{ Ом}.$$

Сумма потерь двигателя

$$\Sigma P = P_1 - P_{\text{ном}} = 1315 - 1000 = 315 \text{ Вт}.$$

Электрические потери

$$P_{\text{э}} = P_{\text{эя}} + P_{\text{эв}} = I^2 R_{\text{я}} + I_{\text{в}}^2 R_{\text{в}} =$$
$$= 11{,}34^2 \cdot 0{,}88 + 0{,}66^2 \cdot 166 = 185{,}4 \text{ Вт}.$$

Потери магнитные и механические

$$P_{\text{м}} + P_{\text{мх}} = \Sigma P - P_{\text{э}} = 315 - 185{,}4 = 129{,}4 \text{ Вт}.$$

Так как мощность, потребляемая двигателем при холостом ходе, приближенно равна потерям в стали, в цепи возбуждения и механическим потерям, то ток холостого хода

$$I_{\text{х}} = I_{\text{в}} + P_{\text{п}} / U_{\text{ном}} = 0{,}66 + 129{,}4/110 = 1{,}8 \text{ А}.$$

9.8. Определить частоту вращения двигателя постоянного тока П12 при холостом ходе и номинальной нагрузке, если известно, что регулирование производилось за счет изменения сопротивления в цепи возбуждения и магнитный поток имел три значения: 1) $\Phi_{\text{ном}}$; 2) $\Phi_1 = 0{,}8\Phi_{\text{ном}}$; 3) $\Phi_2 = 0{,}5\Phi_{\text{ном}}$.

Паспортные данные двигателя: $P_{\text{ном}} = 1$ кВт; $U_{\text{ном}} = 220$ В; $n_{\text{ном}} = 3000$ об/мин; $I_{\text{я ном}} = 5{,}6$ А; $R_{\text{я}} = 2{,}0$ Ом, $\eta = 77\%$.

Решение. Определение частоты вращения при регулировании двигателей постоянного тока за счет изменения магнитного потока производим в такой последовательности. Определяем частоту вращения двигателя при холостом ходе и номинальном магнитном потоке:

$$n_{\text{х}} = n_{\text{ном}} \frac{U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}} - I_{\text{ном}} R_{\text{я}}} = 3000 \frac{220}{220 - 5{,}6 \cdot 2} = 3160 \text{ об/мин}.$$

Частоты вращения якоря и магнитные потоки связаны соотношением

$$n_{1\text{х}} / n_{\text{х}} = \Phi_{\text{ном}} / \Phi_1.$$

Отсюда частота вращения при холостом ходе и пониженном магнитном потоке $\Phi_1 = ,08\Phi_{ном}$

$$n_{1x} = n_x \frac{\Phi_{ном}}{\Phi_1} = 3160 \frac{1}{0,8} = 3950 \text{ об/мин.}$$

Частота вращения при холостом ходе и пониженном магнитном потоке $\Phi_2 = 0,5\Phi_{ном}$

$$n_{2x} = n_x \frac{\Phi_{ном}}{\Phi_2} = 3160 \frac{1}{0,5} = 6320 \text{ об/мин.}$$

Для определения частоты вращения при номинальном моменте и пониженном магнитном потоке вначале определяют перепад частоты вращения между холостым ходом и номинальной нагрузкой. Перепад частоты вращения

$$\Delta n_1 = (n_x - n_{ном})(\Phi_{ном}/\Phi_1)^2 =$$
$$= (3160 - 3000)(1/0,8)^2 = 250 \text{ об/мин,}$$
$$\Delta n_2 = (n_x - n_{ном})(\Phi_{ном}/\Phi_2)^2 =$$
$$= (3160 - 3000)(1/0,5)^2 = 640 \text{ об/мин.}$$

Частота вращения при номинальном моменте и магнитном потоке $\Phi_1 = 0,8\Phi_{ном}$

$$n_{1ном} = n_{1x} - \Delta n_1 = 3950 - 250 = 3700 \text{ об/мин;}$$

то же, при магнитном потоке $\Phi_2 = 0,5\Phi_{ном}$

$$n_{2ном} = n_{2x} - \Delta n_2 = 6320 - 640 = 5680 \text{ об/мин.}$$

По известной частоте вращения холостого хода и номинальной частоте вращения для данного магнитного потока можно построить механические характеристики двигателя при изменении основного магнитного потока.

9.9. Генератор постоянного тока с независимым возбуждением должен использоваться в системе генератор—двигатель для регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока П12.

Используя данные задачи 9.8, выбрать генератор для регулирования частоты вращения двигателя П12. Определить пределы регулирования частоты вращения от максимального до минимального значения при холостом ходе и номинальном вращающем моменте.

Решение. Для выбора генератора постоянного тока, используемого в системе генератор—двигатель,

необходимо учесть, что номинальная мощность генератора должна быть равна или превышать потребляемую мощность двигателя с учетом возникающих перегрузок.

Потребляемая мощность двигателя П12

$$P_1 = U_{ном} I_{ном} = 220 \cdot 5,9 = 1298 \text{ Вт} \approx 1,3 \text{ кВт.}$$

Выбираем генератор мощностью не менее 1,3 кВт, напряжением 230 В, с номинальным током не менее 6 А. Этим данным соответствует генератор типа П22, имеющий следующие паспортные данные: мощность $P_{ном} = 1,6$ кВт, номинальное напряжение $U_{ном} = 230$ В, номинальный ток $I_{ном} = 7$ А, номинальная частота вращения $n_{ном} = 2850$ об/мин, КПД $\eta = 83,5\%$, сопротивление обмотки якоря $R_{я1} = 1,55$ Ом. Определяем общее сопротивление цепи якоря двигателя и генератора (обмотки якоря, генератора и двигателя включены последовательно):

$$R_{общ} = R_{я\,дв} + R_{яг} = 2,0 + 1,55 = 3,55 \text{ Ом.}$$

ЭДС генератора в номинальном режиме

$$E_г = U_{г\,ном} + I_{яг} R_{яг} = 230 + 7 \cdot 1,55 = 240,85 \text{ В.}$$

Напряжение на выходе генератора при номинальной нагрузке двигателя

$$U_г = E - I_{я\,дв} R_{общ} = 240,85 - 5,9 \cdot 3,55 = 220,97 \text{ В,}$$

что соответствует номинальному режиму двигателя.

Для определения частоты вращения двигателя в различных режимах находим произведение постоянной двигателя на магнитный поток:

$$c_E \Phi = \frac{E}{n_{ном}} = \frac{U_{ном} - I_{ном} R_{я\,дв}}{n_{ном}} = \frac{220 - 5,9 \cdot 2,0}{3000} = 0,0694 \text{ Вб.}$$

Отсюда максимальная частота вращения двигателя при холостом ходе определяется отношением ЭДС генератора в номинальном режиме к произведению $c_E \Phi$:

$$n_x = E_г / (c_E \Phi) = 240,85 / 0,0694 = 3458 \text{ об/мин.}$$

Минимальную частоту вращения двигателя при холостом ходе определяют по минимальному значению ЭДС генератора, при которой двигатель приходит во вращение. Предположим, что пуск

двигателя происходит при полуторакратном значении номинального тока. Отсюда минимальную ЭДС генератора, необходимую для вращения якоря двигателя, определяют по следующему уравнению:

$$E_{\text{г min}} = 1{,}5 I_{\text{я дв}} R_{\text{общ}} = 1{,}5 \cdot 5{,}9 \cdot 3{,}55 = 31{,}4 \text{ В}.$$

Минимальная частота вращения двигателя:
при холостом ходе

$$n_{\min} = E_{\text{г min}} / (c_E \Phi) = 31{,}4 / 0{,}0694 = 452 \text{ об/мин};$$

при номинальном моменте

$$n_{\min} = \frac{E_{\text{г min}} - I_{\text{я дв}} R_{\text{общ}}}{\cdot\, C_E \Phi} = \frac{31{,}4 - 5{,}9 \cdot 3{,}55}{0{,}0694} = 150 \text{ об/мин}.$$

Следовательно, при изменении напряжения на выходе генератора частота вращения двигателя при холостом ходе изменяется в пределах от 3488 до 452 об/мин и при номинальном моменте на валу двигателя — от 3000 до 150 об/мин.

Выходную мощность генератора при номинальной нагрузке двигателя определяют как произведение выходного напряжения на номинальный ток двигателя:

$$P_{\text{г вых}} = U_{\text{г}} I_{\text{я дв}} = 220{,}97 \cdot 5{,}9 = 1303 \text{ Вт}.$$

Мощность, потребляемая генератором при номинальном режиме двигателя,

$$P_{1\text{г ном}} = P_{\text{г вых}} / \eta = 1303 / 0{,}82 = 1590 \text{ Вт}.$$

Для определения мощности двигателя, который приводит во вращение генератор, необходимо учесть возможные нагрузки. Предположим, что они не будут превышать 30% от номинального тока двигателя П12:

$$P_{1\text{г}} = \frac{P_2}{\eta} = \frac{U_{\text{вых}} 1{,}3 I_{\text{я дв}}}{\eta} = \frac{220{,}97 \cdot 1{,}3 \cdot 5{,}9}{0{,}835} = 2030 \text{ Вт}.$$

9.10. Двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением включен в сеть с напряжением $U = 220$ В и при номинальном вращающем моменте $M_{\text{ном}} = 101{,}7$ Н·м развивает частоту вращения $n_{\text{ном}} = 750$ об/мин; КПД двигателя $\eta = 75\%$. Сопротивления: обмотки якоря $R_{\text{я}} = 0{,}443$ Ом, обмотки возбуждения $R_{\text{в}} = 0{,}197$ Ом, пускового реостата $R_{\text{п}} = 1{,}17$ Ом.

Определить номинальную, потребляемую и электромагнитную мощности, вращающий момент при пуске, если соответствующее увеличение тока приводит к увеличению магнитного потока в 1,2 раза.

Решение. Номинальную мощность находим из уравнения

$$M = 9{,}55 \frac{P}{n},$$

откуда

$$P_{\text{ном}} = \frac{M_{\text{ном}} n_{\text{ном}}}{9{,}55} = \frac{101{,}7 \cdot 750}{9{,}55} = 8000 \text{ Вт}.$$

Потребляемая мощность

$$P_1 = P_{\text{ном}} / \eta = 8000 / 0{,}75 = 10\,666 \text{ Вт}.$$

Ток якоря в двигателе последовательного возбуждения равен току в цепи возбуждения и потребляемому току:

$$I_1 = I_{\text{я}} = I_{\text{в}} = P_1 / U_{\text{ном}} = 10\,666 / 220 = 48{,}5 \text{ А}.$$

ЭДС обмоток якоря

$$E_{\text{я}} = U_{\text{ном}} - I_{\text{я}} (R_{\text{я}} + R_{\text{в}}) = 220 - 48{,}5 (0{,}443 + 0{,}197) = 189 \text{ В}.$$

Электромагнитная мощность

$$P_{\text{эм}} = E_{\text{я}} I_{\text{я}} = 189 \cdot 48{,}5 = 9166 \text{ Вт}.$$

Пусковой ток

$$I_{\text{г}} = \frac{U_{\text{ном}}}{(R_{\text{я}} + R_{\text{в}}) + R_{\text{п}}} = \frac{220}{(0{,}443 + 0{,}197) + 1{,}17} = 121{,}5 \text{ А}.$$

Кратность пускового тока

$$K_I = I_{\text{п}} / I_{\text{ном}} = 121{,}5 / 48{,}5 = 2{,}5.$$

Вращающий момент при пуске и возрастании тока в 2,5 раза приводит к увеличению магнитного потока в 1,2 раза:

$$M_{\text{п}} = c_M 1{,}2 \Phi \cdot 2{,}5 I_{\text{я}} = 3 \cdot 101{,}7 = 305 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

9.11. Двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением работает при напряжении на зажимах $U = 110$ В и токе $I_{\text{ном}} = 24$ А. Якорь двигателя вращается с частотой $n_{\text{ном}} = 1500$ об/мин и развивает на валу вращающий момент $M = 14{,}0$ Н·м. Общее сопротивление обмоток якоря и возбуждения

$R_{общ}=0{,}35$ Ом. Определить электромагнитную, полезную и потребляемую мощности, электрические, магнитные и механические потери. Как изменяются потребляемый ток, магнитный поток, частота вращения, потребляемая мощность и КПД при понижении подводимого напряжения до 90 В и при неизменном вращающем моменте на валу?

Решение. ЭДС обмотки якоря

$$E_я=U-I_я R_{общ}=110-24\cdot 0{,}35=101{,}6 \text{ В},$$

так как $I_я=I_в=I_{ном}$.

Электромагнитная мощность

$$P_{эм}=EI_я=101{,}6\cdot 24=2438{,}4 \text{ Вт}.$$

Полезная мощность, развиваемая двигателем на валу,

$$P_{ном}=M_{ном}n_{ном}/9{,}55=14\cdot 1500/9{,}55=2200 \text{ Вт}.$$

Потребляемая мощность при номинальной нагрузке

$$P_1=U_{ном}I_{ном}=110\cdot 24=2640 \text{ Вт}.$$

Электрические потери в обмотках якоря и возбуждения

$$P_э=P_1-P_{эм}=2640-2438{,}4=201{,}6 \text{ Вт},$$

или

$$P_э=I^2R_{общ}=24^2\cdot 0{,}35=201{,}6 \text{ Вт}.$$

Потери механические и магнитные

$$P_{мх}+P_м=P_{эм}-P_{ном}=2438{,}4-2200=238{,}4 \text{ Вт}.$$

КПД при номинальном режиме

$$\eta=P_{ном}/P_1=2200/2640=0{,}833.$$

При понижении напряжения на зажимах двигателя до 90 В и неизменном вращающем моменте на валу ток якоря и магнитный поток остаются неизменными, а частота вращения понижается (см. решение задачи 9,5):

$$n_1=n_{ном}\frac{U_1-I_я R_{1\,общ}}{U_{ном}-I_я R_{общ}}=1500\frac{90-24\cdot 0{,}35}{110-24\cdot 0{,}35}=1204 \text{ об/мин}.$$

Мощность на валу двигателя

$$P_2=M_{ном}n_1/9{,}55=14\cdot 1204/9{,}55=1766 \text{ Вт}.$$

Потребляемая мощность

$$P_1=U_1I_я=90\cdot 24=2160 \text{ Вт}.$$

КПД при пониженном напряжении

$$\eta_1=P_2/P_1=1766/2160=0{,}811.$$

Следовательно, с понижением подводимого напряжения при неизменном вращающем моменте потребляемый ток (ток якоря), магнитный поток, электрические потери ($I_я R_{общ}$ — постоянные) остаются неизменными, а частота вращения; потребляемая мощность и КПД понижаются и составляют к первоначальному значению:

$$n=\frac{n_1}{n_{ном}}100\%=\frac{1204}{1500}100\%=80\%;$$

$$P_2=\frac{P_2}{P_{ном}}100\%=\frac{1766}{2200}100\%=80\%;$$

$$\eta=\frac{\eta_1}{\eta_{ном}}100\%=\frac{0{,}811}{0{,}833}100\%=97{,}3\%.$$

9.12. Шестиполюсный двигатель постоянного тока смешанного возбуждения работает от сети с напряжением $U=220$ В и вращается с частотой $n=1000$ об/мин. Двигатель рассчитан на номинальный ток $I_{ном}=13{,}3$ А, КПД $\eta=75{,}2\%$, сопротивление цепи якоря $R_я=1{,}65$ Ом, сопротивление параллельной обмотки возбуждения $R_в=183$ Ом, имеется три пары параллельных ветвей и 240 проводников обмотки якоря. Определить магнитный поток, вращающий момент на валу двигателя, электромагнитную, потребляемую и номинальную мощности.

Решение. Для определения магнитного потока предварительно найдем ток якоря и ЭДС обмотки якоря.

Ток в параллельной обмотке возбуждения

$$I_в=U_{ном}/R_в=220/183=1{,}2 \text{ А},$$

откуда ток в цепи якоря

$$I_я=I_{ном}-I_в=13{,}3-1{,}2=12{,}1 \text{ А}.$$

ЭДС, наводимая в обмотке якоря,

$$E_я=U_{ном}-I_я R_я=220-12{,}1\cdot 1{,}65=200 \text{ В}.$$

Магнитный поток определяем из формулы $E=\frac{pN}{60a}n_{ном}\Phi$, откуда

$$\Phi=\frac{60aE}{pNn_{ном}}=\frac{60\cdot3\cdot200}{3\cdot240\cdot1000}=0{,}05\text{ Вб}.$$

Мощности:
электромагнитная

$$P_{эм}=E_я I_я=200\cdot12{,}1=2420\text{ Вт};$$

потребляемая

$$P_1=U_1 I_{ном}=220\cdot13{,}3=2926\text{ Вт};$$

номинальная

$$P_{ном}=P_1\eta=2926\cdot0{,}752=2200\text{ Вт}.$$

Вращающий момент на валу двигателя при номинальной нагрузке

$$M=9{,}55P_{ном}/n_{ном}=9{,}55\cdot2200/1000=21\text{ Н}\cdot\text{м}.$$

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

9.13. Определить полюсное деление машины постоянного тока, если диаметр якоря $d=0{,}319$ м, а число полюсов равно 2.

9.14. Определить магнитный поток машины постоянного тока, если магнитная индукция $B=1$ Тл, длина якоря $l=0{,}25$ м, а полюсное деление $\tau=0{,}1$ м.

9.15. Коллектор двигателя с параллельным возбуждением имеет 40 коллекторных пластин и 10 витков в секции. Определить число проводников обмотки якоря и число пазов якоря.

9.16. Найти ЭДС, наводимую в обмотке якоря двигателя постоянного тока, если частота вращения двигателя 1000 об/мин, магнитный поток $\Phi=2{,}0\cdot10^{-2}$ Вб, а постоянная машины $c_E=10$.

9.17. Определить ЭДС обмотки якоря машины постоянного тока, если магнитный поток $\Phi=5\cdot10^{-2}$ Вб, число паров полюсов $p=2$, частота вращения $n=1000$ об/мин, число пар параллельных ветвей $a=2$, число активных проводников якоря $N=120$.

9.18. Найти магнитный поток машины постоянного тока, если $E=100$ В, постоянная машина $c_E=2$, а число оборотов $n=1000$ об/мин.

9.19. Определить частоту вращения якоря машины постоянного тока, если $E=100$ В, $N=120$, $\Phi=5\cdot10^{-2}$ Вб, $p=2$, $a=2$.

9.20. Известно, что при частоте вращения якоря $n_я=1450$ об/мин ЭДС $E=120$ В. Найти постоянную машины c_E, если магнитный поток $\Phi=2\cdot10^{-2}$ Вб.

9.21. Найти ЭДС генератора при частотах вращения якоря $n_1=1450$ и $n_2=2850$ об/мин, если магнитный поток $\Phi=1{,}2\cdot10^{-2}$ Вб, а постоянный коэффициент $c_E=12$.

9.22. Определить ЭДС, наводимую в обмотке якоря двигателя последовательного возбуждения, если число пар параллельных ветвей обмотки $a=2$. Число активных проводников обмотки $N=860$, число пар полюсов $p=2$, магнитный поток $\Phi=1{,}2\cdot10^{-2}$ Вб. Частота вращения $n=1450$ об/мин.

9.23. Якорь четырехполюсного генератора имеет число коллекторных пластин $K=93$, витков в каждой секции $w=6$ и число пар параллельных ветвей $a=2$. Определить ЭДС генератора, если частота вращения якоря $n=1450$ об/мин, а магнитный поток якоря $\Phi=8\cdot10^{-3}$ Вб.

9.24. ЭДС шестиполюсного генератора постоянного тока $E=210$ В. Определить частоту вращения якоря, если магнитный поток полюса $\Phi=1{,}7\cdot10^{-2}$ Вб, $N=500$, $a=3$.

9.25. Двигатель постоянного тока вращается с частотой $n=1500$ об/мин, магнитный поток $\Phi=2\cdot10^{-2}$ Вб. Сколько полюсов у двигателя, если отношение числа активных проводников обмотки якоря к числу пар ее параллельных ветвей равно 70? ЭДС двигателя $E=210$ В.

9.26. Машина постоянного тока имеет следующие паспортные данные: число пазов $Z=36$, число витков в пазу $w=10$, число пар полюсов и пар параллельных ветвей $p=a=2$. Чему равен магнитный поток Ф, необходимый для создания в обмотке якоря ЭДС $E=211$ В при частоте вращения $n=750$ об/мин?

9.27. Определить число активных проводников в якоре, если известно, что число пар параллельных ветвей равно числу пар полюсов, ЭДС обмотки якоря $E=212$ В, магнитный поток $\Phi=0{,}02$ Вб, частота вращения $n=3000$ об/мин.

9.28. При увеличении частоты вращения генератора постоянного тока в 1,5 раза ЭДС возросла

на 250 В. Вычислить первоначальное значение ЭДС при неизменном магнитном потоке.

9.29. Частота вращения двигателя постоянного тока уменьшилась с 3000 до 1500 об/мин. Как изменилась ЭДС обмоток якоря, если магнитный поток оставался неизменным?

9.30. Определить напряжение на зажимах генератора параллельного возбуждения при номинальном сопротивлении нагрузки $R_1 = 2$ Ом, если известно, что ЭДС $E = 118$ В, $R_я = 0{,}05$ Ом, сопротивление обмотки возбуждения $R_в = 25$ Ом.

9.31. Определить напряжение на зажимах генератора параллельного возбуждения, если известно, что сопротивление обмотки возбуждения $R_в = 1{,}0$ Ом, сопротивление регулировочного реостата $R = 22$ Ом, а ток цепи возбуждения $I_в = 5$ А.

9.32. Найти ЭДС генератора параллельного возбуждения и ток в обмотке якоря, если напряжение на зажимах генератора $U = 115$ В, сопротивление цепи якоря $R_я = 0{,}04$ Ом, сопротивление обмотки возбуждения $R_в = 25{,}6$ Ом, сопротивление в цепи нагрузки $R = 1{,}53$ Ом.

9.33. Определить сопротивление в цепи нагрузки, если при ЭДС генератора $E = 240$ В и сопротивлении цепи якоря $R_я = 0{,}4$ Ом ток якоря $I_я = 6{,}25$ А.

9.34. Найти ток якоря и обмотки возбуждения генератора параллельного возбуждения, если напряжение на зажимах генератора $U = 230$ В, сопротивление цепи возбуждения $R_в = 28{,}75$ Ом, а ток нагрузки $I_{ном} = 25$ А.

9.35. Напряжение генератора параллельного возбуждения $U = 115$ В, номинальный ток $I_{ном} = 100$ А. Определить ток в цепи якоря и мощность на выходе, если сопротивление обмотки возбуждения $R_в = 46$ Ом.

9.36. Генератор постоянного тока с параллельным возбуждением имеет следующие номинальные данные: $U_{ном} = 115$ В, $I_{ном} = 100$ А, $R_я = 0{,}05$ Ом, $R_в = 35{,}9$ Ом. Определить ЭДС генератора в номинальном режиме, электрические потери в цепи якоря и обмотке возбуждения, электромагнитную мощность и падение напряжения в цепи якоря.

9.37. Определить сопротивление якоря, чтобы ЭДС генератора смешанного возбуждения составляла $E = 240$ В при токе в цепи якоря $I = 90$ А и сопротивлении нагрузки 2,0 Ом.

9.38. Напряжение на зажимах генератора со смешанным возбуждением $U = 115$ В. Сопротивление обмотки якоря $R_я = 0{,}24$ Ом, а сопротивление последовательной обмотки $R_п = 0{,}06$ Ом. Определить ЭДС якоря генератора и сопротивление параллельной обмотки возбуждения, если ток во внешней цепи $I_{ном} = 40$ А, а ток возбуждения $I_в = 1{,}5$ А. Найти напряжение U на зажимах машины, если ток нагрузки возрос до 60 А.

9.39. Определить частоту вращения генератора постоянного тока с независимым возбуждением, если $c_E = 2$, $Ф = 2{,}1 \cdot 10^{-2}$ Вб, а напряжение холостого хода $U_х = 120$ В.

9.40. Обмотка якоря двухполюсного генератора с параллельным возбуждением имеет число проводников $N = 252$, магнитный поток $Ф = 2{,}3 \cdot 10^{-2}$ Вб. Частота вращения якоря $n = 1450$ об/мин. Число пар параллельных ветвей обмотки якоря $a = 1$. Определить напряжение на зажимах генератора, если $R_я = 0{,}2$ Ом, ток нагрузки $I = 30$ А, а ток в обмотке возбуждения $I_в = 2{,}0$ А.

9.41. Определить напряжение на зажимах четырехполюсного генератора с параллельным возбуждением, если сопротивление обмотки якоря $R_я = 1$ Ом, обмотки возбуждения $R_в = 100$ Ом, отношение числа активных проводников к числу пар параллельных ветвей составляет 510, магнитный поток $Ф = 1{,}85 \cdot 10^{-2}$ Вб, частота вращения $n = 1450$ об/мин.

9.42. Определить напряжение на нагрузке, имеющей сопротивление $R = 150$ Ом и подключенной к генератору с последовательным возбуждением, который вращается с частотой $n = 1450$ об/мин и имеет магнитный поток $Ф = 0{,}02$ Вб, сопротивление обмотки якоря 0,25 Ом, обмотки возбуждения $R = 2$ Ом и постоянную машины $c_E = 4{,}2$.

9.43. Найти полезную мощность генератора смешанного возбуждения с нагрузочным током $I = 60$ А, если напряжение на его зажимах $U = 230$ В.

9.44. Мощность генератора $P_2 = 18$ кВт, потери мощности в обмотке якоря $P_я = 1{,}5$ кВт. Чему равен ток якоря, если ЭДС $E = 243{,}7$ В?

9.45. Определить электромагнитную мощность, развиваемую якорем генератора параллельного возбуждения, если $E = 240$ В, $I_в = 2$ А, а $I_{ном} = 108$ А.

9.46. Найти сопротивление якоря, если ток якоря $I_я = 78$ А, мощность генератора $P_2 = 9{,}0$ кВт, а электромагнитная $P_{эм} = 9{,}3$ кВт.

9.47. ЭДС генератора параллельного возбуждения $E = 120$ В, сопротивление цепи якоря $R_я = 0{,}2$ Ом, сопротивление обмотки возбуждения $R_в = 36$ Ом, сопротивление внешней цепи $R = 1$ Ом. Определить ток в якоре, напряжение на зажимах генератора, ток в цепи возбуждения, ток во внешней цепи, мощность, отдаваемую генератором.

9.48*. Генератор постоянного тока с параллельным возбуждением имеет номинальную мощность $P_{ном} = 50$ кВт при напряжении $U = 115$ В, сопротивление якоря $R_я = 0{,}009$ Ом, сопротивление обмотки возбуждения $R_в = 11$ Ом. Определить токи возбуждения, нагрузки, якоря, ЭДС генератора, потери в цепи якоря, потери в цепи возбуждения.

9.49*. Генератор постоянного тока с параллельным возбуждением питает лампы накаливания с общим сопротивлением $R = 3$ Ом, при этом напряжение на зажимах генератора $U = 114$ В, сопротивление якоря $R_я = 0{,}1$ Ом, ток обмотки возбуждения $I_в = 2$ А. Определить ток якоря, ЭДС обмоток якоря, электромагнитную мощность на выходе генератора.

9.50*. Генератор постоянного тока с параллельным возбуждением имеет следующие номинальные данные: мощность $P_{ном} = 14{,}0$ кВт, напряжение $U_{ном} = 115$ В, частоту вращения $n_{ном} = 2850$ об/мин, сопротивление цепи якоря $R_я = 0{,}03$ Ом, сопротивление цепи возбуждения $R_в = 57{,}5$ Ом. Магнитные и механические потери составляют 5% от номинальной мощности генератора. Определить ток якоря, ЭДС, КПД и номинальный вращающий момент.

9.51*. КПД η генератора последовательного возбуждения при напряжении $U = 220$ В и токе $I_{ном} = 20$ А равен 94%. Определить сопротивление цепи якоря, сопротивление цепи нагрузки, ЭДС, наводимую в обмотке якоря, полезную мощность генератора.

9.52*. Ток генератора параллельного возбуждения $I = 60{,}87$ А при напряжении $U = 230$ В. Вычислить ток в цепи возбуждения, сопротивление цепи возбуждения, ток в цепи якоря, ЭДС, наводимую в обмотке якоря, сопротивление цепи якоря, если потери в цепи якоря составляют 4%, а потери в цепи возбуждения — 5% от полезной мощности генератора.

9.53*. Генератор параллельного возбуждения имеет номинальную мощность $P_{ном} = 50$ кВт, напряжение $U = 230$ В, частоту вращения $n = 1450$ об/мин, сопротивление цепи якоря $R_я = 0{,}01$ Ом, сопротивление обмотки возбуждения $R_в = 11$ Ом. Найти ток якоря, ток обмотки возбуждения, ЭДС, наводимую в обмотке якоря, потери в цепи якоря, потери в обмотке возбуждения, потери на гистерезис, вихревые токи и механическое трение, если коэффициент полезного действия генератора $\eta = 87\%$.

9.54*. Номинальная мощность четырехполюсного генератора параллельного возбуждения $P_{ном} = 7{,}2$ кВт, напряжение $U = 230$ В, $R_я = 0{,}2$ Ом, $R_в = 65{,}7$ Ом. Определить частоту вращения якоря, если обмотка якоря имеет 240 активных проводников и две пары параллельных ветвей, магнитный поток $\Phi = 2{,}1 \cdot 10^{-2}$ Вб.

9.55*. Генератор параллельного возбуждения имеет следующие паспортные данные: номинальная мощность $P_{ном} = 14$ кВт, номинальное напряжение $U_{ном} = 115$ В, номинальная частота вращения $n_{ном} = 2850$ об/мин, магнитный поток $\Phi = 2{,}1 \cdot 10^{-2}$ Вб, число пар параллельных ветвей обмотки якоря $a = 2$, число активных проводников обмотки якоря $N = 120$, число пар полюсов $p = 2$, ток возбуждения $I_в = 4{,}0$ А. Вычислить ток генератора при номинальной мощности, ток в якоре, ЭДС, индуцируемую в обмотке якоря, сопротивления цепи якоря и цепи возбуждения.

9.56*. Якорь четырехполюсного генератора с параллельным возбуждением имеет в обмотке число активных проводников $N = 252$ и вращается с частотой $n = 1450$ об/мин. Ток нагрузки $I_{ном} = 65$ А, число пар параллельных ветвей $a = 2$. Определить напряжение на зажимах генератора и отдаваемую им мощность, если магнитный поток якоря $\Phi = 2{,}0 \cdot 10^{-2}$ Вб, сопротивление якоря $R_я = 0{,}1$ Ом, а обмотки возбуждения $I_в = 5$ А.

9.57. Двигатель параллельного возбуждения имеет следующие паспортные данные: напряжение $U_{ном} = 220$ В, номинальный ток $I_{ном} = 10$ А, ток возбуждения $I_в = 2$ А, сопротивление якоря $R_я = 1$ Ом. Чему равна ЭДС якоря?

9.58. Определить напряжение сети постоянного тока, если номинальный ток двигателя $I_{ном} = 10$ А, ЭДС при номинальной частоте вращения $E = 105$ В, сопротивление цепи якоря $R_я = 0{,}5$ Ом.

9.59. Найти ЭДС двигателя, если известны сопротивление цепи якоря $R_я = 0{,}2$ Ом, потребляемый ток $I_1 = 10$ А, напряжение сети $U = 220$ В.

9.60. Определить ток обмотки якоря, если подводимое напряжение $U = 220$ В, ЭДС $E = 218$ В, а сопротивление цепи якоря $R_я = 0{,}1$ Ом.

9.61. Найти пусковой ток двигателя параллельного возбуждения, если двигатель работает при напряжении $U = 110$ В, сопротивление цепи якоря $R_я = 2{,}5$ Ом, ток в обмотке возбуждения $I_в = 1$ А.

9.62. Напряжение питания двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением $U = 220$ В. Пусковой ток якоря $I_п$ без пускового реостата равен 275 А. Определить ток в якоре работающего двигателя, если ЭДС якоря $E = 210$ В.

9.63. Определить сопротивление пускового реостата для двигателя с параллельным возбуждением, имеющего паспортные данные: напряжение $U = 220$ В, номинальный ток $I_{ном} = 20$ А, сопротивление $R_я = 0{,}5$ Ом,— при условии, что пусковой ток не должен превышать номинального значения.

9.64. Двигатель параллельного возбуждения имеет следующие паспортные данные: напряжение $U = 110$ В, сопротивление якоря $R_я = 0{,}5$ Ом, номинальный ток якоря $I_{ном} = 10$ А. Определить сопротивление пускового реостата, чтобы ограничить значение пускового тока $I_п$ до $2I_{ном}$.

9.65. Двигатель с параллельным возбуждением включен в сеть с напряжением $U = 220$ В, при сопротивлении в цепи якоря $R_я = 0{,}4$ Ом номинальный ток $I_{ном} = 20$ А. Определить пусковой ток при отсутствии пускового реостата и сопротивление реостата при условии $I_п = 2{,}5I_{ном}$.

9.66. Двигатель параллельного возбуждения с номинальной электрической мощностью $P_{ном} = 11$ кВт и номинальным напряжением $U = 220$ В имеет сопротивление якоря $R_я = 0{,}22$ Ом и сопротивление обмотки возбуждения $R_в = 55$ Ом. Определить сопротивление пускового реостата, если известно, что пусковой ток не должен превышать номинальный более чем в 2,5 раза.

9.67. В цепь якоря двигателя параллельного возбуждения введен пусковой реостат сопротивлением $R = 2{,}5$ Ом. При этом пусковой ток превышает номинальный в 2,5 раза и равен 78 А. Определить

сопротивление цепи якоря и пусковой ток при отсутствии реостата и напряжении $U = 220$ В.

9.68. Найти сопротивление в цепи якоря двигателя параллельного возбуждения в момент пуска, если наибольшее сопротивление пускового реостата $R = 4$ Ом, а ток в момент пуска при напряжении сети $U = 110$ В $I = 22$ А.

9.69. Каким должно быть сопротивление регулировочного реостата двигателя параллельного возбуждения, чтобы ток в обмотке возбуждения $I_в$ не превышал 1 А, если напряжение, подводимое к двигателю, $U = 110$ В, а сопротивление обмотки возбуждения $R_в = 30$ Ом?

9.70. Мощность, потребляемая двигателем постоянного тока из сети, $P_1 = 1{,}5$ кВт. Полезная мощность, отдаваемая двигателем в нагрузку, $P = 1{,}125$ кВт. Определить КПД двигателя.

9.71. Вычислить переменные потери в двигателе последовательного возбуждения, если ток якоря $I_я = 18$ А, сопротивление обмотки якоря $R_я = 0{,}3$ Ом, сопротивление обмотки возбуждения $R_п = 0{,}2$ Ом.

9.72. Вычислить электрические потери в двигателе параллельного возбуждения, если ток якоря $I_я = 18$ А, сопротивление обмотки якоря $R_я = 0{,}3$ Ом, сопротивление обмотки возбуждения $R_в = 170$ Ом, а подводимое напряжение $U = 110$ В.

9.73. Вычислить переменные потери в двигателе смешанного возбуждения, если ток якоря $I_я = 18$ А, сопротивление обмотки якоря $R_я = 0{,}3$ Ом, сопротивление последовательной обмотки $R_п = 0{,}2$ Ом, а параллельной обмотки $R_в = 170$ Ом.

9.74. Двигатель параллельного возбуждения присоединен к сети постоянного тока с напряжением $U = 220$ В и потребляет ток $I_{ном} = 33$ А. Чему равна номинальная мощность двигателя, если КПД $\eta = 82\%$?

9.75. Какую мощность потребляет двигатель последовательного возбуждения, если он присоединен к сети с напряжением $U = 110$ В, а общее сопротивление в цепи якоря $R_{общ} = 20$ Ом?

9.76*. Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения имеет следующие паспортные данные: мощность $P_{ном} = 8$ кВт, напряжение $U = 220$ В, частота вращения $n_{ном} = 3000$ об/мин, сопротивление цепи якоря $R_я = 0{,}1$ Ом, сопротивление цепи возбуждения

$R_в = 110$ Ом, КПД $\eta = 84\%$. Определить номинальные токи двигателя, возбуждения, якоря, пусковой ток при отсутствии пускового реостата, сопротивление пускового реостата для ограничения пускового тока до 2,0 $I_{я ном}$, потери в обмотках якоря и возбуждения, механические и магнитные потери и номинальный вращающий момент.

9.77. Двигатель параллельного возбуждения имеет номинальное напряжение $U = 110$ В, номинальный ток $I_{ном} = 25{,}8$ А, сопротивление цепи якоря $R_я = 0{,}2$ Ом и сопротивление обмотки возбуждения $R_в = 136$ Ом. Определить ток $I_в$ в обмотке возбуждения, ток $I_я$ в якоре, потери в обмотке возбуждения, потери в цепи якоря, ЭДС, индуцируемую в обмотке якоря, и электромагнитную мощность двигателя.

9.78. Двигатель параллельного возбуждения включен в сеть с напряжением $U = 220$ В. Ток двигателя $I = 12{,}2$ А, сопротивление цепи возбуждения $R_в = 100$ Ом и сопротивление цепи якоря $R_я = 1$ Ом. Найти ток в цепи возбуждения, ток в цепи якоря, потери в цепи возбуждения, потери в цепи якоря и ЭДС, наводимую в обмотке якоря.

9.79. Двигатель параллельного возбуждения потребляет мощность $P_1 = 70$ кВт при токе якоря $I_я = 360$ А. КПД двигателя $\eta = 90\%$. Определить сопротивление цепи якоря, полезную мощность на валу двигателя, сумму потерь в двигателе, если электрические потери в цепи якоря $P_{эя} = 2333$ Вт.

9.80*. Двигатель параллельного возбуждения работает от сети с напряжением $U = 110$ В. Ток в якоре двигателя при холостом ходе $I_х = 4{,}0$ А, сопротивление цепи якоря $I_в = 0{,}1$ Ом, ток возбуждения $I_в = 1{,}0$ А. Найти механические и магнитные потери, полезную мощность на валу двигателя при нагрузке и КПД, если двигатель нагружен так, что ток в якоре $I_я = 25$ А. Потери $P_м + M_{мх}$ предполагают постоянными.

9.81*. Двигатель параллельного возбуждения имеет следующие паспортные данные: номинальная мощность $P_{ном} = 8{,}0$ кВт, номинальное напряжение $U = 220$ В, номинальный ток возбуждения $I_в = 1{,}0$ А номинальный КПД $\eta = 84{,}0\%$, сопротивление цепи якоря $R_я = 0{,}1$ Ом. Определить ток двигателя при холостом ходе.

9.82*. В двигателе постоянного тока с параллельным возбуждением при напряжении $U = 220$ В

ток якоря при холостом ходе $I_х = 2{,}5$ А, при номинальном режиме $I_{ном} = 10$ А. Определить, в каком случае электромагнитная мощность больше, если сопротивление цепи якоря $R_я = 2$ Ом.

9.83*. Генератор параллельного возбуждения имеет следующие паспортные данные: $P_{ном} = 2{,}7$ кВт, $U = 230$ В, $n_{ном} = 1450$ об/мин, сопротивление цепи якоря $R_я = 1{,}6$ Ом, сопротивление цепи возбуждения $R_в = 133$ Ом. Данный генератор, работая двигателем вхолостую при номинальном напряжении и номинальном токе возбуждения, развивает номинальную частоту вращения при токе в якоре $I_х = 2$ А. Каковы потери вращения, т. е. потери от гистерезиса, вихревых токов и механического трения?

9.84. Определить вращающий момент двигателя, если при частоте вращения $n = 1000$ об/мин ток в обмотке якоря $I_я = 43$ А, а ЭДС $E = 210$ В.

9.85. Определить максимальный вращающий момент двигателя в процессе пуска, если момент холостого хода $M_х = 5$ Н·м, полезный момент $M_п = 85$ Н·м, а динамический момент $M_{дин}$ при возрастании частоты достиг 15 Н·м.

9.86. Определить вращающий момент на валу двигателя, если при напряжении $U = 220$ В потребляемый ток $I_{ном} = 103$ А, КПД $\eta = 0{,}8$, а частота вращения $n = 750$ об/мин.

9.87. Найти вращающий момент двигателя постоянного тока, если ток якоря $I_я = 62{,}8$ А, магнитный поток $\Phi = 0{,}05$ Вб, число проводников якоря $N = 120$, число пар полюсов и пар параллельных ветвей равно 4.

9.88. Определить магнитный поток двигателя постоянного тока, если вращающий момент $M = 80$ Н·м, ток якоря $I_я = 31{,}4$ А, число проводников обмотки якоря $N = 400$, число пар полюсов и пар параллельных ветвей $p = a = 2$.

9.89. Двигатель параллельного возбуждения МП-82 имеет следующие паспортные данные: мощность $P_{ном} = 130$ кВт, $U_{ном} = 220$ В, частота вращения $n_{ном} = 600$ об/мин, ток $I_я = 635$ А. Определить номинальный вращающий момент и частоту вращения якоря при холостом ходе, если $R_я = 0{,}0072$ Ом.

9.90. Определить КПД и вращающий момент двигателя при номинальной нагрузке, если номинальная мощность $P_{ном} = 2{,}5$ кВт при напряжении

$U=110$ В, токе $I_{ном}=28{,}3$ А, частоте вращения $n=1500$ об/мин.

9.91*. Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением имеет следующие паспортные данные: напряжение $U=220$ В, ток якоря $I_я=100$ А, сопротивление якоря $R_я=0{,}2$ Ом, магнитный поток $\Phi=0{,}01$ Вб, постоянная машины $c_M=63{,}6$. Определить ЭДС якоря, вращающий момент и частоту вращения якоря.

9.92. Двигатель с параллельным возбуждением имеет следующие паспортные данные: напряжение $U=220$ В, ток $I_{ном}=42{,}0$ А, частота вращения $n=1500$ об/мин, ток обмотки возбуждения $I_в=2$ А, сопротивление обмотки якоря $R_я=0{,}5$ Ом. Определить частоту вращения якоря двигателя при холостом ходе.

9.93. Определить частоту вращения двигателя с параллельным возбуждением при холостом ходе, если $U=220$ В, $I_{ном}=108$ А, $n_{ном}=1000$ об/мин, $R_я=0{,}08$ Ом, $I_в=3$ А.

9.94. Определить постоянную машины $c_E\Phi$, связывающую ЭДС с частотой вращения, если подводимое напряжение $U=220$ В, ток якоря двигателя с параллельным возбуждением $I_я=10$ А, сопротивление якоря $R_я=0{,}1$ Ом, частота вращения якоря $n=1500$ об/мин.

9.95. Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением имеет следующие паспортные данные: напряжение $U=220$ В, номинальный ток $I_{я\,ном}=170$ А, мощность $P_{ном}=32$ кВт, частота вращения $n_{ном}=1500$ об/мин, сопротивление цепи якоря $R_я=0{,}067$ Ом. Определить частоту вращения якоря при холостом ходе и номинальный вращающий момент.

9.96. Определить сопротивление якоря двигателя постоянного тока, если известно, что частота вращения якоря при холостом ходе $n_х=3173$ об/мин, при номинальной нагрузке $n_{ном}=3000$ об/мин, ток $I_я=10$ А, подводимое напряжение $U=110$ В.

9.97. Четырехполюсный двигатель включен в сеть с напряжением $U=220$ В. Ток в якоре $I_я=100$ А, частота вращения $n=750$ об/мин, магнитный поток $\Phi=5{,}6\cdot10^{-2}$ Вб, число активных проводников обмотки якоря $N=300$. Число пар параллельных ветвей $a=2$. Вычислить электромагнитную мощность двигателя, мощность на валу, если потери в стали

составляют 5%, а потери трения — 2% от электромагнитной мощности.

9.98. Двигатель параллельного возбуждения включен в сеть с напряжением $U=220$ В и вращается с частотой $n=750$ об/мин. Ток двигателя $I_{ном}=63{,}0$ А, ЭДС, индуцируемая в обмотке якоря, $E=209$ В, сопротивление обмотки возбуждения $R_в=88$ Ом. Вычислить ток в якоре, сопротивление цепи якоря, полезную мощность на валу двигателя, полезный вращающий момент, если КПД $\eta=80\%$.

9.99. Двигатель параллельного возбуждения имеет следующие паспортные данные: номинальное напряжение $U=220$ В, номинальный ток $I_{ном}=55$ А, номинальная частота вращения $n_{ном}=1500$ об/мин, номинальный ток возбуждения $I_в=5{,}0$ А, сопротивление цепи якоря $R_я=0{,}02$ Ом. Найти частоту вращения двигателя, если напряжение на его зажимах уменьшится до $U_1=180$ В, при этом поддерживаются неизменными ток в цепи возбуждения и тормозной момент.

9.100*. Двигатель с параллельным возбуждением имеет следующие паспортные данные: напряжение $U=220$ В, ток якоря $I_я=100$ А, сопротивление якоря $R_я=0{,}15$ Ом, магнитный поток $\Phi=6{,}8\cdot10^{-3}$ Вб, постоянная машины $c_E=20$. Определить ЭДС, обмотки якоря, электромагнитную мощность, вращающий момент и частоту вращения.

9.101*. Четырехполюсный двигатель параллельного возбуждения работает от сети с напряжением $U=220$ В. Ток в якоре двигателя $I_я=170$ А, число проводников обмотки якоря $N=212$, магнитный поток $\Phi=0{,}04$ Вб, число пар параллельных ветвей обмотки якоря $a=2$ и сопротивление цепи якоря $R_я=0{,}05$ Ом. Определить частоту вращения якоря при номинальной нагрузке и холостом ходе.

9.102*. Четырехполюсный двигатель с параллельным возбуждением работает при напряжении $U=220$ В и потребляет ток $I_1=78$ А, число проводников якоря $N=600$, магнитный поток $\Phi=2{,}2\cdot10^{-2}$ Вб. Сопротивление якоря $R_я=0{,}171$ Ом, ток в обмотке возбуждения $I_в=2{,}5$ А, КПД $\eta=0{,}82$, число пар параллельных ветвей в обмотке якоря $a=2$. Определить частоту вращения якоря и вращающий момент.

9.103. Определить мощность P_1, подводимую к двигателю параллельного возбуждения, имеющему следующие паспортные данные: номинальная мощность на

валу $P_{ном}=6{,}0$ кВт, номинальное напряжение $U=220$ В, номинальный ток $I_{ном}=32$ А, номинальная частота вращения $n_{ном}=1000$ об/мин. Найти КПД и номинальный вращающий момент двигателя.

9.104. Определить вращающий момент двигателя параллельного возбуждения, имеющего частоту вращения $n=1000$ об/мин. Потребляемый ток $I_1=11{,}1$ А, напряжение $U=110$ В, сопротивление цепи якоря $R_я=0{,}7$ Ом, сопротивление цепи возбуждения $R_в=100$ Ом.

9.105. Четырехполюсный двигатель параллельного возбуждения работает от сети с напряжением $U=110$ В. Потребляемый ток двигателя $I_1=210$ А, сопротивления цепи возбуждения $R_в=11$ Ом и цепи якоря $R_я=0{,}026$ Ом. Вычислить ЭДС, наводимую в обмотке якоря, частоту вращения якоря, если магнитный поток $Ф=0{,}0249$ Вб, число проводников обмотки якоря $N=252$ и число параллельных ветвей обмотки якоря $a=2$.

9.106. Двухполюсный двигатель параллельного возбуждения работает от сети с напряжением $U=220$ В. Потребляемый ток двигателя $I_1=62$ А, сопротивления цепи возбуждения $R_в=110$ Ом и цепи якоря $R_я=0{,}15$ Ом. Определить ЭДС, наводимую в обмотке якоря, частоту вращения, если магнитный поток $Ф=0{,}02$ Вб, число проводников обмотки якоря $N=420$ и число параллельных ветвей обмотки якоря $a=1$.

9.107*. Технические данные некоторых двигателей постоянного тока серии П указаны в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Тип двигателя	Мощность P, кВт	Напряжение U, В	Частота вращения $n_{ном}$, об/мин	Номинальный ток $I_{ном}$, А	КПД η, %	Сопротивления	
						якоря $R_я$, Ом	параллельной обмотки, $R_в$, Ом
П32	4,5	220	3000	24,3	84	0,265	417
П42	4,5	220	1500	25,4	80,5	0,403	109
П52	4,5	220	1000	25,2	81,0	0,517	137
П61	4,5	220	750	26	78,0	0,577	147
П32	4,5	110	3000	48,5	84,0	0,066	103
П42	4,5	110	1500	51,0	80	0,101	33
П52	4,5	110	1000	50,5	81	0,161	62
П61	4,2	110	750	48,9	78	0,149	64

Определить мощность, потребляемую двигателем при номинальной нагрузке, сумму потерь, электрические потери в обмотках якоря и возбуждения, магнитные и механические потери, электромагнитную мощность, вращающий момент на валу, частоту вращения при холостом ходе, сопротивление пускового реостата при условии $I_п=2{,}5I_{ном}$.

9.108. Определить КПД двигателя последовательного возбуждения, если мощность на валу $P_2=4{,}5$ кВт, подводимое напряжение $U=220$ В, а потребляемый ток $I_1=24{,}3$ А.

9.109. Двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением имеет следующие паспортные данные: $U=220$ В, $I_{ном}=160$ А, $\eta=86\%$. Определить потребляемую мощность и мощность на валу.

9.110. Двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением имеет следующие паспортные данные: $U=220$ В, $P_{ном}=25$ кВт, $\eta=0{,}88$, $R_{общ}=0{,}025$ Ом. Определить потребляемую и электромагнитную мощности, электрические потери, ЭДС обмоток якоря.

9.111. Тяговый двигатель последовательного возбуждения имеет следующие паспортные данные: $P_{ном}=19$ кВт, $U=220$ В; $I_{ном}=98{,}6$ А; $n_{ном}=3000$ об/мин. Вычислить мощность, подводимую к двигателю, коэффициент полезного действия и вращающий момент двигателя.

9.112. Двигатель с последовательным возбуждением работает при напряжении на зажимах $U=110$ В и токе $I_1=24$ А. Якорь вращается с частотой $n=1500$ об/мин и развивает на валу момент $M=14$ Н·м. Сопротивление обмоток якоря и возбуждения $R_{ном}=0{,}28$ Ом. Определить ЭДС двигателя, мощность на валу двигателя и КПД.

9.113. Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения типа П91 с номинальным напряжением $U=220$ В имеет мощность на валу $P_{ном}=25$ кВт, ток $I_{ном}=136$ А и частоту вращения $n=750$ об/мин. Определить вращающий момент двигателя и его КПД.

9.114. Двигатель последовательного возбуждения включен в сеть с напряжением $U=220$ В и вращается с частотой $n=750$ об/мин; при этом ЭДС, индуцируемая в обмотке якоря, $E=205$ В. Определить магнитный поток, падение напряжения в цепи якоря и ток двигателя, если сопротивление цепи якоря $R_я=0{,}05$ Ом, число проводников обмотки якоря

$N=210$, число пар полюсов $p=2$, число параллельных ветвей обмотки якоря $a=2$.

9.115. Двигатель последовательного возбуждения включен в сеть с напряжением $U=220$ В и вращается с частотой $n=1000$ об/мин. При этом ток в якоре $I_я=100$ А. Магнитный поток $\Phi=7{,}1\cdot10^{-2}$ Вб. Вычислить ЭДС, наводимую в обмотке якоря, сопротивление цепи якоря и вращающий момент M, развиваемый двигателем, если число проводников обмотки якоря $N=180$, число полюсов 4, число параллельных ветвей обмотки якоря 4.

9.116*. Двигатель последовательного возбуждения включен в сеть с напряжением $U=220$ В, вращается с частотой $n=1500$ об/мин, при этом вращающий момент на валу двигателя $M_2=477{,}5$ Н·м, сопротивление цепи якоря $R_я=0{,}02$ Ом и КПД $\eta=89{,}5\%$. Найти полезную мощность на валу двигателя, мощность, подводимую к двигателю, ток в якоре, электрические потери в цепи якоря и электродвижущую силу, наводимую в обмотке якоря.

9.117*. Двигатель с последовательным возбуждением при напряжении $U=220$ В развивает на валу вращающий момент $M=70$ Н·м при токе $I_1=60$ А и частоте вращения $n=1500$ об/мин. Тот же двигатель при том же напряжении развивает вращающий момент $M=162$ Н·м при токе $I_2=90$ А и частоте вращения $n=1000$ об/мин. Определить отношение потребляемых мощностей, мощностей на валу, токов и КПД.

9.118*. Двигатель смешанного возбуждения работает от сети с напряжением $U=220$ В, потребляет из сети мощность $P=75$ кВт, ток в параллельной обмотке возбуждения $I_в=4{,}5$ А и КПД $\eta=89{,}5\%$. Определить потребляемый ток двигателя, ЭДС, наводимую в обмотке якоря, мощность на валу двигателя, вращающий момент, если частота вращения $n=1500$ об/мин, а сопротивление цепи якоря $R_я=0{,}02$ Ом.

9.119*. Четырехполюсный двигатель смешанного возбуждения работает от сети с напряжением $U=220$ В и вращается с частотой $n=964$ об/мин, при этом ток двигателя $I_{ном}=172$ А, сопротивления: цепи якоря $R_я=0{,}068$ Ом, параллельной цепи возбуждения $R_в=44$ Ом, число проводников обмотки якоря $N=276$, число параллельных ветвей обмотки якоря $a=2$. Определить ток в якоре, ЭДС, наводимую в обмотке якоря, магнитный поток, электромагнитную мощность двигателя, мощность на валу двигателя, вращающий момент на валу двигателя и КПД, если механические и магнитные потери составляют $P_{мх}=1544$ Вт.

9.120*. Двигатель параллельного возбуждения имеет следующие номинальные паспортные данные: мощность $P_{ном}=42$ кВт, напряжение $U=220$ В, ток $I_{ном}=204$ А, ток возбуждения $I_в=4{,}0$ А, частота вращения $n_{ном}=1000$ об/мин, сопротивление цепи якоря $R_я=0{,}04$ Ом. С какой частотой надо вращать данную машину, чтобы она работала в качестве генератора при напряжении $U=230$ В, если номинальный ток в обмотке якоря останется неизменным?

9.121*. Определить частоту вращения при холостом ходе и номинальном вращающем моменте, если регулирование частоты вращения производилось изменением магнитного потока с $\Phi_{ном}$ до $\Phi_1=0{,}5\,\Phi_{ном}$. Характеристики двигателя: $P_{ном}=5$ кВт, $U=220$ В, $I_{ном}=30$ А, $n_{ном}=955$ об/мин, $R_я=0{,}66$ Ом.

9.122*. Найти частоту вращения при холостом ходе и при номинальном моменте, если регулирование частоты вращения производилось изменением магнитного потока с $\Phi_{ном}=5\cdot10^{-2}$ Вб до $\Phi_1=2{,}5\cdot10^{-2}$ Вб. Двигатель имеет следующие паспортные данные: число проводников в якоре $N=120$, число пар полюсов и пар параллельных ветвей $p=a=2$, ток якоря $I_я=62{,}8$ А, номинальная частота вращения $n_{ном}=2000$ об/мин.

КАЧЕСТВЕННЫЕ ЗАДАЧИ

9.123. Обмотка якоря имеет 600 витков. Определить число активных проводников этой обмотки.

9.124. Обмотка якоря имеет 20 секций по 24 витка в каждой. Определить число проводников в обмотке якоря.

Якорь имеет число пазов $Z=26$ по четыре проводника в каждом пазу. Определить число активных проводников в обмотке якоря.

9.125. Почему с увеличением количества включаемых ламп осветительной сети возрастает электромагнитный тормозной момент генератора?

9.126. Как влияет на изменение вращающего момента генератора увеличение тока в обмотке якоря?

9.127. Как изменится напряжение на зажимах генераторов с параллельным и последовательным возбуждением, если при одинаковых частотах вращения и сопротивлениях в цепи якоря нагрузочный ток возрастает в два раза?

9.128. У какого генератора (с независимым возбуждением или с самовозбуждением) при возрастании частоты вращения якоря быстрее нарастает напряжение на зажимах?

9.129. Как изменится ЭДС генератора с независимым возбуждением при понижении частоты вращения якоря в два раза?

9.130. Определить ток якоря генератора параллельного возбуждения, если номинальный ток двигателя $I_{ном} = 50$ А, а ток обмотки возбуждения $I_в = 2$ А.

9.131. Изменится ли КПД генератора при изменении тока в цепи нагрузки?

9.132. Почему в момент пуска начальный ток двигателя постоянного тока в несколько раз превышает номинальный ток?

9.133. Ток в обмотке якоря изменился от тока холостого хода до номинального значения. В каком случае ЭДС машины имела максимальное значение?

9.134. ЭДС обмотки якоря уменьшилась. Как изменятся значения тока якоря, потребляемой мощности и частоты вращения двигателя с параллельным возбуждением?

9.135. Почему с понижением тока возбуждения частота вращения в двигателях с параллельным возбуждением возрастает?

9.136. Как изменяются частота вращения, вращающий момент и потребляемая мощность двигателя с последовательным возбуждением при понижении нагрузки на валу?

9.137. Почему с понижением частоты вращения при постоянной мощности вращающий момент двигателя возрастает?

9.138. Почему при неизменном подводимом напряжении ЭДС двигателя меняется с изменением частоты вращения якоря?

9.139. Какая существует зависимость между ЭДС якоря и потребляемым током?

9.140. У какого двигателя (с последовательным или параллельным возбуждением) обмотка возбуждения имеет большее сопротивление?

9.141. У какого двигателя (с параллельным или последовательным возбуждением) обмотка возбуждения имеет большее число витков?

9.142. Почему при обрыве обмотки возбуждения в двигателя с параллельным возбуждением ток обмотки якоря достигает максимального значения и опасен для двигателя?

9.143. Может ли быть у двигателя с параллельным возбуждением ЭДС выше подводимого напряжения?

9.144. В каком режиме будет работать двигатель с параллельным возбуждением, если частота вращения якоря (под действием внешних причин) окажется выше частоты вращения при идеальном холостом ходе?

9.145. Как повлияет на ЭДС обмоток якоря двигателя параллельного возбуждения обрыв цепи возбуждения?

9.146. Механическая нагрузка на валу двигателя с последовательным возбуждением уменьшилась. Как повлияет это изменение на ЭДС обмотки якоря?

9.147. Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением имеет номинальную частоту вращения $n = 3000$ об/мин. Можно ли получить за счет регулирования частоту вращения $n = 3600$ об/мин?

9.148. Механическая нагрузка на валу двигателя постоянного тока понизилась. Уменьшится или увеличится ЭДС обмоток якоря?

9.149. Как изменится частота вращения у двигателей последовательного и параллельного возбуждения при понижении нагрузки на валу?

9.150. Как изменится частота вращения двигателя с последовательным возбуждением, если параллельно обмотке возбуждения включить добавочное сопротивление $R_д = R_в$?

9.151. Номинальный ток двигателя с последовательным возбуждением $I_{ном} = 50$ А. Чему равен ток обмотки возбуждения и якоря?

9.152. Номинальный ток двигателя с параллельным возбуждением $I_{ном} = 50$ А, обмотки возбуждения $I_в = 2$ А. Определить ток в цепи якоря.

9.153. Тормозной момент на валу двигателя увеличился. Можно ли однозначно ответить, уменьшится или увеличится КПД?

9.154. От каких величин зависит вращающий момент, развиваемый двигателем на валу? Как можно регулировать вращающий электромагнитный момент?

9.155. Чему пропорциональны вращающие моменты двигателей с параллельным и последовательным возбуждением?

9.156. Как изменится вращающий момент двигателя с параллельным возбуждением, если ток якоря и магнитный поток возбуждения увеличились в два раза?

9.157. Ток якоря электродвигателя с параллельным возбуждением увеличился в два раза, а магнитный поток уменьшился в два раза. Как изменится вращающий момент?

9.158. Определить вращающий момент двигателя, если мощность на валу $P_2 = 10$ кВт, а частота вращения $n = 955$ об/мин.

9.159. Две машины постоянного тока серии П имеют различные номинальные напряжения. Первая $U_{ном} = 110$ В, вторая $U_{ном} = 115$ В. Какая из машин — генератор, какая — двигатель?

9.160. Два двигателя имеют одинаковые мощность и вращающий момент. Как изменится ток каждого двигателя, если вращающий момент на валу понизился до 0,9 от первоначального значения? Известно, что один двигатель с параллельным, а другой — с последовательным возбуждением.

9.161. Можно ли определить, какой из двух двигателей с параллельным возбуждением, а какой — с последовательным, если известно, что при одинаковых номинальных характеристиках и нагрузке выше номинальной частота вращения первого двигателя оказалась меньше, а при нагрузке ниже номинальной — больше, чем у второго?

Глава 10
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ И УРАВНЕНИЯ

Скольжение s — это отношение разности между частотой вращения магнитного поля статора и частотой вращения ротора машины переменного тока к частоте вращения магнитного поля:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}; \quad s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100\%, \qquad (10.1)$$

где n_1, n_2 — частота вращения магнитного поля и ротора, об/мин.

Критическое скольжение — это скольжение, при котором асинхронная машина развивает максимальный вращающий момент:

$$s_{кр} = s_{ном}\left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}\right), \qquad (10.2)$$

где $\lambda = M_{max}/M_{ном}$ — коэффициент, определяющий перегрузочную способность двигателя: $s_{ном}$ — скольжение при номинальной нагрузке.

Частота вращения магнитного поля асинхронной машины

$$n_1 = 60 f_1 / p, \qquad (10.3)$$

где f_1 — частота тока питающей сети, Гц; p — число пар полюсов обмотки машины.

Частота вращения ротора

$$n_2 = n_1(1 - s) = \frac{60 f_1}{p}(1 - s). \qquad (10.4)$$

Частота тока и ЭДС, наводимая магнитным полем статора в проводниках ротора,

$$f_2 = s f_1 = s \frac{p n_1}{60}. \qquad (10.5)$$

Действующее значение ЭДС, наводимой в каждой фазе обмотки статора,

$$E_1 = 4{,}44 f_1 w_1 \Phi_m K_{O1}, \qquad (10.6)$$

где w_1 — число витков одной фазы статора; Φ_m — амплитудное значение магнитного потока вращающегося магнитного поля, Вб; K_{O1} — обмоточный коэффициент статора. Действующее значение ЭДС обмотки неподвижного ротора

$$E_2 = 4{,}44 f_2 w_2 \Phi_m K_{O2}, \qquad (10.7)$$

где $f_2 = f_1$ — частота ЭДС, наводимой в проводниках ротора, Гц; w_2 — число витков одной фазы ротора; K_{O2} — обмоточный коэффициент ротора.

Действующее значение ЭДС обмотки вращающегося ротора

$$E_{2s} = E_2 s, \qquad (10.8)$$

где E_2 — ЭДС неподвижного ротора, В.

Отношение ЭДС обмоток статора E_1 к ЭДС обмоток ротора E_2 называют коэффициентом трансформации асинхронного двигателя:

$$n = E_1/E_2 = K_{01}w_1/(K_{02}w_2). \quad (10.9)$$

Активная мощность, потребляемая двигателем из сети,

$$P_1 = 3U_{1\phi}I_{1\phi}\cos\varphi = \sqrt{3}U_1 I_1 \cos\varphi, \quad (10.10)$$

где $U_{1\phi}$ — фазное значение напряжения, В; $I_{1\phi}$ — фазное значение тока, А; U_1 — линейное значение напряжения, В; I_1 — линейное значение тока, А; $\cos\varphi$ — угол сдвига фаз между током и напряжением (коэффициент мощности).

Таким образом,

$$P_1 = P_2/\eta, \quad (10.11)$$

где η — КПД двигателя.

Мощности:

реактивная

$$Q_1 = 3U_{1\phi}I_{1\phi}\sin\varphi = \sqrt{3}U_1 I_1 \sin\varphi, \quad (10.12)$$

где $\sin\varphi = \sqrt{1-\cos^2\varphi}$;

электромагнитная

$$P_{эм} = P_1 - \Delta P_1 = \sqrt{3}U_1 I_1 \cos\varphi - (P_{1э} + P_{1м}) = M\omega_1 = \frac{P_{2э}}{s}, \quad (10.13)$$

где ΔP_1 — потери в статоре, Вт; $P_{1э} = 3R_1 I_1^2$ — электрические потери в статоре, Вт; $P_{1м}$ — магнитные потери статора, Вт; M — вращающий момент, Н·м; ω_1 — угловая синхронная частота вращающегося магнитного поля, рад/с.

Полезная мощность на валу двигателя

$$P_2 = P_1 - \sum P = P_1 - (P_{1э} + P_{1м} + P_{2э} + P_{2м} + P_{мх} + P_д), \quad (10.14)$$

$$P_2 = P_1\eta, \quad (10.15)$$

$$P_2 = P_{эм}(1-s) = M\omega_2, \quad (10.16)$$

$$P_2 = Mn_2/9{,}55, \quad (10.17)$$

где

$$\sum P = P_{1э} + P_{1м} + P_{2э} + P_{2м} + P_{мх} + P_д \quad (10.18)$$

— сумма потерь асинхронного двигателя, Вт; $P_{2э}$ — электрические потери ротора, Вт; $P_{2м}$ — магнитные потери ротора, Вт; $P_{мх}$, $P_д$ — механические и дополнительные потери, Вт; ω_2 — угловая частота вращающегося ротора, рад/с; M — вращающий момент на валу двигателя, Н·м.

Вращающий момент на валу асинхронного двигателя

$$M = 9{,}55P_2/n_2; \quad (10.19)$$

$$M = \frac{3E_2 I_2 \cos\varphi_2}{\omega_1}; \quad (10.20)$$

$$M = C_м I_{2s}\Phi_m \cos\varphi_2; \quad (10.21)$$

$$M = C_1 U_1^2, \quad (10.22)$$

где C_1 — постоянный коэффициент, зависящий от конструктивных данных двигателя; I_{2s} — ток вращающегося ротора; А; $\cos\varphi_2$ — угол сдвига фаз между током и ЭДС ротора.

Токи в неподвижном роторе I_2 и во вращающемся роторе I_{2s} находят из выражений

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2} = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}; \quad (10.23)$$

$$I_{2s} = \frac{E_{2s}}{Z_{2s}} = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}}, \quad (10.24)$$

где R_2, X_2 — активное и индуктивное электрические сопротивления обмотки неподвижного ротора, Ом; Z_2 — полное электрическое сопротивление фазы обмотки ротора, Ом.

Приближенно активное электрическое сопротивление одной фазы обмотки ротора можно найти из выражения

$$R_2 = \frac{M_{ном}(n_1 - n_2)}{9{,}55m_2 I_{2ном}^2}, \quad (10.25)$$

где $M_{ном}$ — номинальный момент, Н·м; m_2 — число фаз ротора; $I_{2ном}$ — номинальный ток ротора, А.

Кратность пускового тока

$$K_I = I_п/I_{ном}, \quad (10.26)$$

где $I_п$ — пусковой ток двигателя.

Кратность пускового момента

$$K_м = M_п / M_{ном}, \quad (10.27)$$

где $M_п$ — пусковой момент двигателя.

Перегрузочная способность двигателя

$$\lambda = M_{max} / M_{ном}, \quad (10.28)$$

где M_{max} — максимальный вращающий момент двигателя, Н·м; $M_{ном}$ — номинальный вращающий момент, Н·м.

Сопротивление регулировочного реостата для асинхронного двигателя с фазным ротором

$$R_р = R_2 (s/s_{ном} - 1). \quad (10.29)$$

Индуктивное сопротивление вращающегося ротора

$$X_{2s} = X_2 s, \quad (10.30)$$

где X_2 — индуктивное сопротивление неподвижного ротора.

КПД электрической машины равен отношению полезной активной мощности P_2 к подводимой активной мощности P_1:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum P}{P_1} = 1 - \frac{\sum P}{P_1}. \quad (10.31)$$

Частота вращения ротора и вращающегося магнитного поля статора синхронной машины

$$n = 60f/p. \quad (10.32)$$

Мощность трехфазного генератора при симметричной нагрузке

$$P_2 = 3UI\cos\varphi. \quad (10.33)$$

Вращающий момент генератора

$$M = P_{эм}/\omega = 9{,}55P_1/n_1. \quad (10.34)$$

Уравнение баланса мощностей трехфазного генератора

$$P_2 = P_{эм} - P_э = P_{эм} - 3R_1 I^2. \quad (10.35)$$

Число пазов в обмотке статора

$$Z = 2qpm, \quad (10.36)$$

где q — число пазов, приходящихся на полюс и фазу; m — число фаз для трехфазной обмотки; $m = 3$.

ЭДС первичной обмотки статора синхронной машины

$$E_1 = 4{,}44 f_1 \Phi w_1 K_1. \quad (10.37)$$

Уравнение ЭДС для синхронного генератора

$$\mathbf{U}_1 = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}_c + \mathbf{I}_1 R_1, \quad (10.38)$$

где $\mathbf{E}_0$ — основная ЭДС генератора, В; $\mathbf{E}_c$ — ЭДС реакции якоря и рассеяния, В; $\mathbf{I}_1$ — ток обмотки статора; А; R_1 — активное сопротивление обмотки статора, Ом. КПД трехфазного генератора

$$\eta = P_2/P_1 = P_2/(P_2 + \sum P). \quad (10.39)$$

ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ С РЕШЕНИЯМИ

10.1. Найти ЭДС, индуцируемую в фазе обмоток статора и ротора асинхронного короткозамкнутого двигателя при неподвижном и вращающемся роторе, коэффициент трансформации и процентное значение ЭДС от подводимого напряжения обмотки статора, если известны следующие паспортные данные двигателя: скольжение $s = 4\%$, обмотка статора соединена в «звезду» и подключена к сети переменного тока с линейным напряжением $U_1 = 380$ В, число витков в каждой фазе статора $w_1 = 88$, ротора $w_2 = 12$, магнитный поток $\Phi = 1{,}21 \cdot 10^{-2}$ Вб, обмоточный коэффициент статора $K_{01} = 0{,}92$, ротора $K_{02} = 0{,}95$, частота тока $f = 50$ Гц.

Решение. Определяем ЭДС индуцируемую в фазе обмотки статора: $E_1 = 4{,}44 f_1 w_1 \Phi_m K_{01} = 4{,}44 \cdot 50 \cdot 88 \cdot 1{,}21 \cdot 10^{-2} \cdot 0{,}92 = 217{,}5$ В.

ЭДС, индуцируемая в фазе обмотки неподвижного ротора, $E_2 = 4{,}44 f_1 w_2 \Phi_m K_{02} = 4{,}44 \cdot 50 \cdot 12 \cdot 1{,}21 \times \times 10^{-2} \cdot 0{,}95 = 30{,}6$ В.

Коэффициент трансформации представляет собой отношение ЭДС обмотки статора к ЭДС обмотки ротора:

$$n = E_1/E_2 = 217{,}5/30{,}6 = 7{,}1.$$

ЭДС, индуцируемая в фазе обмотки вращающегося ротора, при скольжении $s = 4\%$

$$E_{2s} = E_2 s = 30{,}6 \cdot 0{,}04 = 1{,}22 \text{ В}.$$

Фазное напряжение обмотки статора

$$U_ф = U_л/\sqrt{3} = 380/1{,}73 = 220 \text{ В}.$$

Отсюда ЭДС в фазе обмотки статора от подводимого напряжения

$$E_1 = \frac{E_1}{U_ф} 100\% = \frac{217{,}5 \cdot 100}{220} = 98{,}8\%.$$

10.2. Асинхронный трехфазный двигатель с короткозамкнутым ротором марки А02-82-6 имеет следующие паспортные данные: напряжение $U = 220/380$ В, номинальная мощность $P_2 = 40$ кВт, частота вращения $n_2 = 980$ об/мин, КПД $\eta = 91{,}5\%$, коэффициент мощности $\cos\varphi = 0{,}91$, кратность пускового тока $K_I = 5$, кратность пускового момента $K_M = 1{,}1$, перегрузочная способность двигателя $\lambda = 1{,}8$. Определить число пар полюсов, номинальное скольжение, номинальные максимальный и пусковой вращающие моменты, номинальный и пусковой токи двигателя при соединении обмотки статора в «треугольник» и «звезду». Возможен ли пуск нагруженного двигателя, если подводимое напряжение на 10% ниже номинального и пуск производится переключением обмоток статора со «звезды» на «треугольник» от сети с напряжением $U = 220$ В?

Р е ш е н и е. Для определения числа пар полюсов можно воспользоваться маркировкой двигателя, частотой вращения магнитного поля или ротора.

Если известна маркировка, то последнее число в марке двигателя означает количество полюсов. В данном двигателе шесть полюсов; следовательно, три пары. При известной частоте вращения магнитного поля число пар полюсов определяем по формуле $p = 60f/n_1$.

По этой же формуле определяем число пар полюсов, если задана частота вращения ротора, но в этом случае получаемый результат округляем до ближайшего целого числа. Например, для заданных условий $p = 60f/n_2 = 3000/980 = 3{,}06$; отбросив сотые доли, получаем число пар полюсов двигателя — 3.

Частота вращения магнитного поля

$$n_1 = 60f/p = 3000/3 = 1000 \text{ об/мин}.$$

Номинальное значение скольжения

$$s_{ном} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\% = \frac{1000 - 980}{1000} = 2\%.$$

Мощность, потребляемая двигателем,

$$P_1 = P_2/\eta = 40\,000/0{,}915 = 43\,715 \text{ Вт}.$$

Номинальный вращающий момент двигателя

$$M_{ном} = 9{,}55\ P_2/n_2 = 9{,}55 \cdot 40\,000/980 = 389{,}8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Максимальный момент

$$M_{max} = \lambda M_{ном} = 1{,}8 \cdot 389{,}8 = 701{,}6 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Пусковой момент

$$M_п = K_M M_{ном} = 1{,}1 \cdot 389{,}8 = 428{,}7 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Для определения фазных, линейных и пусковых токов (фазными являются токи в обмотках статора, линейными — токи в подводящих проводах) нужно учесть следующее: *если двигатель рассчитан на работу от сети переменного тока с напряжением* 220/380 В, *то это значит, что каждая фаза обмотки статора рассчитана на напряжение* 220 В. Обмотку необходимо включить по схеме «треугольник», если в сети линейное напряжение $U = 220$ В, и по схеме «звезда», если в сети линейное напряжение $U = 380$ В.

Определяем фазный, линейный и пусковой токи при линейном напряжении $U = 220$ В и соединении обмотки статора по схеме «треугольник».

Фазный ток в обмотке статора

$$I_ф = \frac{P_1}{3U_ф \cos\varphi} = \frac{43715{,}8}{3 \cdot 220 \cdot 0{,}91} = 72{,}8 \text{ А}.$$

Токи:
линейный

$$I_л = \sqrt{3} I_ф = 1{,}73 \cdot 72{,}8 = 125{,}9 \text{ А};$$

пусковой

$$I_п = K_I I_л = 5 \cdot 125{,}9 = 629{,}5 \text{ А}.$$

Найдем значения фазных, линейных и пусковых токов, если обмотки статора включены по схеме «звезда» и подключены к сети с линейным напряжением $U = 380$ В.

Значение фазного тока найдем из формулы мощностей для линейных значений токов и напряжений

$$P_1 = \sqrt{3}\, U_л I_л \cos\varphi.$$

При соединении обмоток в «звезду» линейный ток

$$I_ф = I_л = \frac{P_1}{\sqrt{3}\, U_л \cos\varphi} = \frac{43715{,}8}{\sqrt{3}\cdot 380 \cdot 0{,}91} = 73 \text{ А},$$

пусковой ток

$$I_п = K_I I_л = 5 \cdot 73 = 365 \text{ А}.$$

Из сопоставления фазных, линейных и пусковых токов при различных соединениях обмоток можно заметить, что фазные токи оказались практически одинаковыми, а линейные и пусковые — различными.

Для определения возможности пуска в ход двигателя, находящегося под номинальной нагрузкой и пониженным напряжением, необходимо определить пусковой вращающий момент при пониженном напряжении.

В соответствии с формулой $M = CU^2$ вращающий момент двигателя пропорционален квадрату подводимого напряжения. При понижении напряжения на 10% вращающий момент $M' = CU^2_{ном} = C(0{,}9U_{ном})^2 = 0{,}81 \times M_{ном} = 0{,}81 \cdot 389{,}8 = 315{,}74$ Н·м. Соответственно пусковой момент $M'_п = K_M M' = 1{,}1 \cdot 315{,}74 = 347{,}3$ Н·м, что меньше тормозного момента на валу на 42,5 Н·м, т. е. пуск невозможен.

Для понижения пусковых токов часто пуск асинхронных двигателей осуществляют при пониженном напряжении. Двигатели, работающие при соединении обмоток статора по схеме «треугольник», пускают без нагрузки путем переключения обмоток со «звезды» на «треугольник». Определить пусковой момент двигателя при данном виде пуска.

В момент пуска обмотки находятся под напряжением $U_ф = U_л/\sqrt{3} = 220/1{,}73 = 127$ В, что составляет 57,7% $U_{ном}$, пусковой момент при переключении обмоток $M_п = CU^2 = C(0{,}577U_{ном})^2 = 0{,}33CU^2_{ном} = 128{,}8$ Н·м, т. е. в три раза меньше номинального значения.

10.3. Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором единой серии А02-92-6 имеет следующие технические характеристики: номинальная мощность на валу $P_{ном} = 75$ кВт, номинальное напряжение сети $U_{ном} = 220/380$ В, номинальное скольжение

$s_{ном} = 0{,}015$, КПД $\eta = 92{,}5\%$, коэффициент мощности при номинальной нагрузке $\cos\varphi_{ном} = 0{,}92$, при холостом ходе $\cos\varphi_х = 0{,}2$, кратность пускового тока $K_I = 6$; кратность пускового момента $K_M = 1{,}1$, кратность максимального момента $\lambda = 1{,}8$. Определить номинальный, максимальный и пусковой вращающие моменты, фазный, линейный и пусковой токи при номинальной нагрузке, ток холостого хода, потери энергии в роторе, общее, активное и индуктивное сопротивления фазы при номинальной нагрузке, частоту вращения ротора при максимальной нагрузке, частоту тока ротора при номинальной и максимальной нагрузках.

Р е ш е н и е. Определяем частоту вращения магнитного поля. Число пар полюсов двигателя указано в обозначении типа двигателя ($p = 3$); для единой серии А2 частота тока $f = 50$ Гц, тогда

$$n_1 = 60f/p = 60 \cdot 50/3 = 1000 \text{ об/мин}.$$

Число оборотов ротора при номинальной нагрузке и при известном скольжении

$$n_{2\,ном} = n_1(1 - s) = 1000(1 - 0{,}015) = 985 \text{ об/мин}.$$

Вращающие моменты:
номинальный

$$M_{ном} = 9{,}55P_{ном}/n_{2\,ном} = 9{,}55 \cdot 75\,000/985 = 727 \text{ Н·м};$$

максимальный

$$M_{max} = \lambda M_{ном} = 1{,}8 \cdot 727 = 1308{,}8 \text{ Н·м};$$

пусковой

$$M_п = K_M M_{ном} = 1{,}1 \cdot 727 = 799{,}8 \text{ Н·м}.$$

Мощность, потребляемая двигателем из сети,

$$P_1 = P_{ном}/\eta = 75\,000/0{,}925 = 81\,081 \text{ Вт}.$$

Из формулы мощности $P_1 = 3U_ф I_ф \cos\varphi$ определяем номинальный фазный ток в обмотках статора при соединении в «треугольник»:

$$I_{ф\,ном} = \frac{P_1}{3U_{ф\,ном}\cos\varphi_{ном}} = \frac{81081}{3 \cdot 220 \cdot 0{,}92} = 133{,}5 \text{ А}.$$

Линейный номинальный ток

$$I_{л\,ном} = \sqrt{3}\, I_{ф\,ном} = 1{,}73 \cdot 133{,}5 = 231 \text{ А}.$$

Умножая линейный ток на кратность пускового тока, получаем пусковой ток:

$$I_{\text{п}} = K_I I_{\text{л ном}} = 6 \cdot 231 = 1386 \text{ А}.$$

Общие потери двигателя составляют разность между потребляемой и номинальной мощностью

$$\sum P = P_1 - P_{\text{ном}} = 81\,081 - 75\,000 = 6081 \text{ Вт}.$$

Ток холостого хода определяем из формулы мощности холостого хода

$$P_{\text{х}} = \sqrt{3}\, U_{\text{ном}} I_{\text{х}} \cos\varphi_{\text{х}},$$

откуда

$$I_{\text{х}} = \frac{P_{\text{х}}}{\sqrt{3} U_{\text{ном}} \cos\varphi_{\text{х}}} = \frac{6081}{1{,}73 \cdot 220 \cdot 0{,}2} = 79{,}9 \text{ А}.$$

Электромагнитную мощность, т. е. мощность, передаваемую электромагнитным путем из статора в ротор, определяем как произведение вращающего момента на угловую частоту вращения магнитного поля:

$$P_{\text{эм}} = M_{\text{ном}} \omega_1 = M_{\text{ном}} \frac{2\pi n_1}{60} = \frac{M_{\text{ном}} n_1}{9{,}55} = \frac{727 \cdot 1000}{9{,}55} = 76\,125 \text{ Вт}.$$

Потери энергии в статоре

$$P_{\text{с}} = P_1 - P_{\text{эм}} = 81\,081 - 76\,125 = 4956 \text{ Вт}.$$

Потери энергии в роторе

$$P_{\text{р}} = \sum P - P_{\text{с}} = 6081 - 4956 = 1125 \text{ Вт}.$$

Сопротивления фазы при номинальной нагрузке: общее

$$Z_{\text{ф}} = U_{\text{ф ном}} / I_{\text{ф ном}} = 220/133{,}5 = 1{,}65 \text{ Ом};$$

активное

$$R_{\text{ф}} = Z_{\text{ф}} \cos\varphi = 1{,}65 \cdot 0{,}92 = 1{,}5 \text{ Ом};$$

индуктивное

$$X_{\text{ф}} = \sqrt{Z_{\text{ф}}^2 - R_{\text{ф}}^2} = \sqrt{1{,}65^2 - 1{,}5^2} = 0{,}68 \text{ Ом}.$$

Критическое скольжение — это скольжение, при котором двигатель развивает максимальный вращающий момент

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{ном}} \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}\right) = 0{,}015 \left(1{,}8 + \sqrt{1{,}8^2 - 1}\right) = 0{,}049.$$

Частота вращения ротора при максимальной нагрузке

$$n_{2\text{кр}} = n_1 (1 - s_{\text{кр}}) = 1000 (1 - 0{,}049) = 951 \text{ об/мин}.$$

Частота тока ротора при номинальной нагрузке

$$f_{2\text{ном}} = f_1 s_{\text{ном}} = 50 \cdot 0{,}015 = 0{,}75 \text{ Гц}.$$

Частота тока ротора при максимальной нагрузке

$$f_{2\max} = f_1 s_{\text{кр}} = 50 \cdot 0{,}049 = 2{,}45 \text{ Гц}.$$

10.4. Трехфазный шестиполюсный асинхронный двигатель с фазным ротором имеет следующие паспортные данные: номинальная мощность $P_2 = 5{,}0$ кВт, номинальное напряжение $U = 220/380$ В, номинальная частота вращения $n_2 = 940$ об/мин, номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi = 0{,}68$, номинальный КПД $\eta = 74{,}5\%$. Определить мощность P_1, подводимую к двигателю, токи двигателя при соединении обмоток статора в «треугольник» и «звезду», вращающий момент $M_{\text{ном}}$ и скольжение $s_{\text{ном}}$, если частота тока в статоре $f = 50$ Гц. Рассчитать сопротивление регулировочного реостата, включаемого в цепь ротора для снижения частоты вращения вала двигателя до $n = 750$ об/мин, при номинальном моменте на валу и соединении обмоток в «звезду».

Решение. Мощность, подводимую к двигателю из сети, определим из формулы

$$\eta = P_{2\text{ном}} / P_1,$$

откуда

$$P_1 = P_{2\text{ном}} / \eta_{\text{ном}} = 5000/0{,}745 = 6711 \text{ Вт}.$$

Токи двигателя при соединении обмоток статора: в «звезду»

$$I_{\text{л}} = \frac{P_1}{\sqrt{3} U_1 \cos\varphi} = \frac{6711}{1{,}73 \cdot 380 \cdot 0{,}68} = 15{,}0 \text{ А};$$

в «треугольник»

$$I_{\Delta} = \frac{P_1}{\sqrt{3} U_1 \cos\varphi} = \frac{6711}{1{,}73 \cdot 220 \cdot 0{,}68} = 25{,}9 \text{ А}.$$

Вращающий момент двигателя при номинальной нагрузке

$$M_{\text{ном}} = 9{,}55 P_{2\text{ном}} / n_{2\text{ном}} = 9{,}55 \cdot 5000/940 = 50{,}8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Скольжение при номинальной нагрузке

$$s_{\text{ном}} = (n_1 - n_{2\,\text{ном}})/n_1 = (1000 - 940)/1000 = 0{,}06,$$

где

$$n_1 = 60f/p = 60 \cdot 50/3 = 1000 \text{ об/мин}.$$

Скольжение при $n_2 = 750$ об/мин

$$s = (n_1 - n_2)\,n_1 = (1000 - 750)/1000 = 0{,}25.$$

Для определения сопротивления регулировочного реостата воспользуемся равенством

$$(R_2 + R_{\text{р}})/s = R_2/s_{\text{ном}},$$

откуда сопротивление регулировочного реостата

$$R_{\text{р}} = R_2\,(s/s_{\text{ном}} - 1).$$

Активное сопротивление фазы ротора найдем из формулы, выражающей зависимость электрических потерь в роторе $P_{э2} = 3R_2I_{2\text{ном}}^2$ от электромагнитной мощности $P_{\text{эм}} = M_{\text{ном}}\,n_1/9{,}55$ при номинальной нагрузке:

$$3R_2I_{2\text{ном}}^2 = s_{\text{ном}}\,\frac{M_{\text{ном}}\,n_1}{9{,}55},$$

откуда

$$R_2 = s_{\text{ном}}\,\frac{M_{\text{ном}}\,n_1}{28{,}65\,I_{2\text{ном}}^2}.$$

Активное сопротивление фазы ротора

$$R_2 = s_{\text{ном}}\,\frac{M_{\text{ном}}\,n_1}{28{,}65\,I_{\text{ном}}^2} = 0{,}06\,\frac{50{,}8 \cdot 1000}{28{,}65 \cdot 152} = 0{,}47 \text{ Ом}.$$

Сопротивление регулировочного реостата

$$R_{\text{р}} = R_2\,(s/s_{\text{ном}} - 1) = 0{,}47\,(0{,}25/0{,}06 - 1) = 1{,}49 \text{ Ом}.$$

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

10.5. Ротор четырехполюсного асинхронного двигателя, подключенный к сети трехфазного тока с частотой $f = 50$ Гц, вращается с частотой 1440 об/мин. Чему равно скольжение?

10.6. Двигатель марки АОЛ-12-6 имеет номинальную частоту вращения $n_2 = 915$ об/мин. Определить номинальное скольжение.

10.7. Определить угловую частоту вращающегося магнитного поля асинхронного двигателя, имеющего синхронную частоту вращения 3000 об/мин.

10.8. Какое число (указывающее количество полюсов) должно быть поставлено в конце марки двигателя 4А180М, если известно, что частота вращения магнитного поля $n = 1500$ об/мин?

10.9. Найти число пар полюсов асинхронного двигателя, питающегося от сети переменного тока с частотой 50 Гц, при частоте вращения магнитного поля статора $n = 1000$ об/мин.

10.10. Ротор асинхронного трехфазного двигателя марки 4АА63А4 вращается с частотой 1450 об/мин. Чему равны скольжение и частота тока ротора?

10.11. Определить номинальное скольжение асинхронного трехфазного двигателя, ротор которого вращается с частотой $n = 2900$ об/мин, если синхронная частота вращения магнитного поля $n_1 = 3000$ об/мин.

10.12. Определить скольжение асинхронного двигателя АОЛБ-011-4, ротор которого вращается с частотой $n_2 = 1370$ об/мин.

10.13. Скольжение шестиполюсного трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при изменении нагрузки от холостого хода до номинального значения изменяется в пределах 0,1—6%. Определить диапазон изменения частоты вращения ротора, если частота питающего напряжения сети $f = 50$ Гц.

10.14. Найти частоту вращения магнитного поля асинхронного шестиполюсного двигателя, подключенного к сети переменного тока с напряжением $U = 220$ В и частотой $f = 50$ Гц.

10.15. Трехфазный двухполюсный асинхронный двигатель при номинальной нагрузке имеет скольжение $s = 4\%$. Чему равна частота вращения ротора, если частота переменного тока питающего обмотку статора $f = 50$ Гц?

10.16. Трехфазный асинхронный двигатель АОЛ2-22-6 с короткозамкнутым ротором имеет скольжение, изменяющееся от 0,4 до 7% при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной. Определить, в каких пределах будет изменяться частота вращения двигателя, если частота тока $f = 50$ Гц.

10.17. Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором вращается с частотой $n_2 = 1440$ об/мин. Определить число пар полюсов и скольжение, если синхронная частота вращения магнитного поля $n_1 = 1500$ об/мин.

10.18. Найти для трехфазного асинхронного двигателя ЭДС E_1, E_2 и E_{2s} при скольжении $s=6\%$, если известно, что амплитуда магнитного потока, приходящегося на один полюс и одну фазу, составляет $\Phi_m=0{,}53\cdot10^{-2}$ Вб, число витков обмоток статора и ротора соответственно $w_1=320$, $w_2=40$, частота тока $f=50$ Гц.

10.19. Определить ЭДС, индуцируемые в фазе обмоток статора и ротора асинхронного короткозамкнутого двигателя при неподвижном и вращающемся роторе, если $\Phi_m=0{,}011$ Вб, $s=0{,}04$, $w_1=96$, $w_2=1{,}5$, $K_{o1}=0{,}92$, $K_{o2}=0{,}98$, $f=50$ Гц.

10.20. Трехфазный асинхронный двигатель включен в сеть переменного тока с напряжением $U=220$ В. Обмотки статора соединены в треугольник, число витков фазы обмотки статора $w_1=336$, ротора $w_2=52$. Скольжение $s=4\%$. Определить ЭДС E_1 и E_2, индуцируемые в фазах обмоток статора и ротора при неподвижном и вращающемся роторе. Падение напряжения в обмотке статора составляет $0{,}01\ U_1$. Обмоточные коэффициенты статора и ротора считать равными единице.

10.21. Определить ЭДС, индуцируемые в фазах обмоток статора и ротора трехфазного асинхронного двигателя при неподвижном и вращающемся роторе, если известны следующие характеристики: скольжение $s=0{,}06$, основной магнитный поток $\Phi_m=1{,}36\times\times10^{-2}$ Вб, число витков фазы обмотки статора $w_1=72$, ротора $w_2=32$, обмоточные коэффициенты обмотки статора и ротора считать равными единице, частота тока $f=50$ Гц.

10.22. Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором включен в сеть переменного тока с напряжением $U=220$ В. Число витков в фазе обмотки статора, соединенной в «треугольник», $w_1=750$, число витков фазы обмотки ротора, соединенной в «звезду», $w_2=300$. Определить ЭДС, индуцируемую в фазе обмотки ротора при разомкнутом и неподвижном роторе, ЭДС вращающегося ротора при скольжении $s=4\%$ и ЭДС ротора, если обмотку статора пересоединить на «звезду». Падением напряжения в обмотках пренебречь и считать, что обмоточные коэффициенты одинаковы.

10.23. Вычислить ЭДС, индуцируемые в фазах обмоток статора и ротора трехфазного асинхронного

двигателя при неподвижном и вращающемся роторе, если известны следующие паспортные данные: скольжение $s=0{,}04$, основной магнитный поток $\Phi_m=1{,}49\cdot10^{-2}$ Вб, число витков фазы обмотки статора $w_1=120$, ротора $w_2=80$, обмоточный коэффициент обмотки статора $K_{o1}=0{,}95$, ротора $K_{o2}=0{,}96$. Частота тока в статоре $f=50$ Гц.

10.24. Основной магнитный поток трехфазного асинхронного двигателя $\Phi_m=4\cdot10^{-3}$ Вб. ЭДС, индуцируемая в обмотке статора, соединенного в «треугольник», $E=220$ В. Определить число витков в фазе обмотки статора, если $K_{o1}=0{,}95$, а $f=50$ Гц.

10.25. Определить ЭДС, наводимые в фазах статора и ротора асинхронного двигателя при неподвижном роторе и при роторе, вращающемся со скольжением $s=0{,}04$. Число витков в обмотке статора $w_1=360$, ротора $w_2=30$, магнитный поток $\Phi_m=0{,}4\cdot10^{-2}$ Вб, частота тока $f=50$ Гц.

10.26. Напряжение питания трехфазного асинхронного двигателя $U_1=660$ В, частота тока сети $f=50$ Гц, число пар полюсов $p=3$. Пренебрегая падением напряжения в обмотке статора, определить ЭДС, индуцируемую в фазе обмотки ротора, и частоту тока, если ротор вращается с частотой $n_2=950$ об/мин. Коэффициент трансформации двигателя $n=15$.

10.27. Определить ЭДС, индуцируемые в фазах обмоток статора и ротора трехфазного асинхронного двигателя при неподвижном и вращающемся роторе, если скольжение $s=3{,}3\%$, число витков обмотки статора $w_1=118$, ротора $w_2=24$, обмоточные коэффициенты обмоток $K_o=0{,}95$, магнитный поток $\Phi_m=0{,}87\cdot10^{-2}$ Вб, частота тока $f=50$ Гц.

10.28. Найти ЭДС, индуцируемые в фазах обмоток статора и ротора трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при неподвижном роторое и его вращении с частотой $n_2=2900$ об/мин, если число витков фазы обмотки статора $w_1=190$, число последовательно соединенных витков фазы обмотки ротора $w_2=24$; обмоточные коэффициенты обмоток считать равными единице, магнитный поток $\Phi_m=0{,}51\cdot10^{-2}$ Вб, частота тока в статоре $f=50$ Гц.

10.29. Число витков фазы обмотки статора асинхронного двигателя $w_1=123$, ротора $w_2=18$,

обмоточные коэффициенты соответственно $K_{o1}=0{,}96$ и $K_{o2}=0{,}975$. Вычислить ЭДС, индуцируемые в фазах обмоток статора и ротора двигателя при неподвижном роторе и при вращении его со скольжением $s=0{,}04$, если магнитный поток $\Phi_m=2{,}5\cdot10^{-2}$ Вб. Двигатель подключен к сети переменного тока частотой $f=50$ Гц.

10.30. Индуктивное сопротивление фазы обмотки неподвижного ротора асинхронного двигателя $X=1{,}45$ Ом. Вычислить индуктивное сопротивление фазы обмотки вращающегося ротора со скольжением $s=0{,}04$.

10.31. Активное и индуктивное сопротивления фазы неподвижного ротора асинхронного короткозамкнутого двигателя соответственно $R_2=0{,}5$ Ом и $X_2=20$ Ом. Определить ток в фазе ротора в момент пуска двигателя и при вращении ротора со скольжением $s=4\%$. Наводимая ЭДС в фазе ротора $E_{2s}=13$ В.

10.32. Определить индуктивное сопротивление неподвижного ротора асинхронного двигателя, если $R_2=3$ Ом, $E_2=107$ В, $I_2=7$ А.

10.33. Мощность, подводимая к асинхронному двигателю, $P=19{,}3$ кВт. Определить КПД двигателя, если суммарные потери составляют 2300 Вт.

10.34. Найти суммарную мощность потерь асинхронного двигателя АО2-62-2, имеющего КПД $\eta=90\%$ и мощность на валу $\sum P=17$ кВт.

10.35. Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором МТ-42-8 потребляет от сети мощность $P_1=19{,}4$ кВт при токе $I_л=73{,}8$ А и напряжении $U=220$ В. Найти КПД и $\cos\varphi$, если мощность на валу двигателя $P_2=16{,}0$ кВт.

10.36. Трехфазный асинхронный двигатель потребляет от сети мощность $P_1=9{,}55$ кВт при токе $I_1=36{,}36$ А и напряжении $U_1=220$ В. Определить КПД и $\cos\varphi$, если полезная мощность на валу двигателя $P_2=7{,}5$ кВт.

10.37. Трехфазный асинхронный двигатель потребляет из сети мощность $P_1=1{,}875$ кВт при токе $I_ф=3{,}5$ А и напряжении $U=220$ В. Чему равен коэффициент мощности $\cos\varphi$ и КПД, если полезная мощность на валу двигателя $P_2=1{,}5$ кВт?

10.38. Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором потребляет из сети мощность $P_1=26{,}0$ кВт при токе $I_1=97{,}6$ А и напряжении $U=220$ В. Чему равен коэффициент мощности и КПД, если полезная мощность на валу двигателя $P_2=22$ кВт?

10.39. При вращении ротора асинхронного двигателя ВАО-72-4 с частотой $n_2=1435$ об/мин подводимая к двигателю мощность $P_1=27{,}47$ кВт, а суммарная мощность потерь $\sum P=2{,}47$ кВт. Найти скольжение двигателя и его КПД, если частота тока $f=50$ Гц.

10.40. Определить скольжение, вращающий момент и мощность, подводимую к трехфазному асинхронному двигателю с фазным ротором МТ-63-10, а также ток в цепи статора при соединении его обмоток в «звезду» и «треугольник», если двигатель имеет следующие паспортные данные: мощность $P_2=60{,}0$ кВт, напряжение $U=220/380$ В, частота вращения $n=577$ об/мин, коэффициент мощности $\cos\varphi=0{,}77$ и $\eta=0{,}885$.

10.41. Определить КПД асинхронного трехфазного двигателя, имеющего номинальную мощность $P_2=100$ кВт, мощность холостого хода $P_х=5{,}4$ кВт и короткого замыкания $P_к=2{,}5$ кВт.

10.42. Трехфазный шестиполюсный асинхронный двигатель потребляет мощность $P_1=4{,}82$ кВт; частота вращения ротора $n_2=960$ об/мин, потери в статоре равны 654 Вт, в роторе — 166 Вт. Определить скольжение, мощность на валу и КПД.

10.43*. Трехфазный асинхронный двигатель имеет в фазах статора и ротора числа витков соответственно $w_1=288$ и $w_2=24$. Определить ток в обмотке статора и подводимую к двигателю мощность, если известно, что номинальный ток в фазе ротора $I_2=250$ А, ток холостого хода составляет 10% от номинального значения тока ротора, линейное напряжение $U_л=660$ В, а $\cos\varphi=0{,}9$.

10.44. Определить ток в фазе ротора асинхронного двигателя: а) в момент пуска; б) при номинальной нагрузке и номинальном скольжении $s=0{,}04$. Известно, что при номинальном скольжении в роторе индуцируется ЭДС $E_{2s}=5$ В. Активное сопротивление фазы $R_2=0{,}2$ Ом, индуктивное при неподвижном роторе $X_2=1{,}1$ Ом.

10.45. Мощность, подводимая к трехфазному двухполюсному асинхронному двигателю, $P_1=19{,}1$ кВт. Электрические потери в обмотке и стали статора

равны 1,74 кВт. Найти электромагнитную мощность, передаваемую со статора на ротор, мощность на валу двигателя и электрические потери в обмотке ротора, если двигатель имеет скольжение $s=3{,}3\%$, а КПД $\eta=88\%$.

10.46*. Восьмиполюсный трехфазный асинхронный двигатель имеет ротор с фазной обмоткой. Паспортные данные двигателя: номинальная мощность $P_{ном}=30{,}0$ кВт, номинальное напряжение $U=220/380$ В, номинальная частота вращения $n_2=725$ об/мин, номинальный КПД $\eta=0{,}86$, номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi=0{,}74$, коэффициент нагрузки $\lambda=3$. Определить полную потребляемую мощность, номинальный вращающий момент, номинальное и критическое скольжение.

10.47. Короткозамкнутый трехфазный асинхронный двигатель имеет следующие паспортные данные: $P_{ном}=5{,}5$ кВт, $n=1450$ об/мин, $U=220/380$ В, $I=19{,}26/11{,}1$ А. Определить число пар полюсов двигателя, скольжение и пусковой ток для случаев соединения обмоток статора в «треугольник» и «звезду» при включении в сеть с напряжением $U=220$ В, если кратность пускового тока равна 5,0, а синхронная частота вращения двигателя $n_1=1500$ об/мин.

10.48. Определить вращающий момент асинхронного четырехскоростного двигателя, имеющего число полюсов 4, 6, 8 и номинальную мощность $P_{ном}=10$ кВт.

10.49. Трехфазный шестиполюсный асинхронный двигатель с фазным ротором включен в сеть переменного тока с напряжением $U=660$ В и преодолевает полезный момент сопротивления $M=390$ Н·м при частоте вращения $n_2=980$ об/мин. Определить мощность на валу двигателя, КПД, скольжение, если фазный ток двигателя $I_ф=26$ А, а коэффициент мощности $\cos\varphi=0{,}91$.

10.50. Крановый трехфазный шестиполюсный асинхронный двигатель с фазным ротором включен в сеть переменного тока с напряжением $U=380$ В и преодолевает момент сопротивления $M=70{,}0$ Н·м при скольжении $s=3\%$. Определить коэффициент мощности $\cos\varphi$, частоту вращения ротора, мощность на валу двигателя и КПД, если известно, что мощность, подводимая к двигателю, $P_1=7{,}5$ кВт при линейном токе $I_л=12{,}5$ А.

10.51. Трехфазный асинхронный двигатель АО2-92-8 с короткозамкнутым ротором имеет мощность $P_2=55$ кВт, напряжение $U=380$ В (при соединении обмоток статора в звезду), частоту вращения ротора при номинальной нагрузке $n_2=740$ об/мин; $\cos\varphi=0{,}9$, КПД $\eta=0{,}925$, отношение пускового тока к номинальному $K_1=5$. Определить номинальный вращающий момент, номинальный и пусковой токи двигателя в фазах и линии.

10.52. Трехфазный восьмиполюсный асинхронный двигатель потребляет мощность $P_1=6{,}47$ кВт при напряжении $U=220$ В и токе $I_л=23{,}55$ А. Определить частоту вращения ротора n_2, мощность P_2 на валу двигателя, коэффициент мощности $\cos\varphi$ и КПД, если вращающий момент двигателя $M_2=72{,}5$ Н·м, скольжение $s=3{,}0\%$, частота тока $f=50$ Гц.

10.53. Трехфазный шестиполюсный асинхронный двигатель потребляет мощность $P_1=6{,}7$ кВт при напряжении $U=380$ В и токе $I_1=15{,}0$ В. Определить частоту вращения ротора n_2, полезную мощность P_2 на валу двигателя, коэффициент мощности $\cos\varphi$ и КПД η, если момент двигателя $M_2=49{,}2$ Н·м, скольжение $s=3{,}0\%$, частота тока $f=50$ Гц.

10.54. Трехфазный восьмиполюсный асинхронный двигатель с фазным ротором имеет следующие паспортные данные: номинальная мощность $P_2=22$ кВт, номинальное напряжение $U=220/380$ В, номинальная частота вращения $n_2=723$ об/мин, номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi=0{,}70$, номинальный КПД $\eta=84{,}5\%$. Вычислить мощность P_1, подводимую и двигателю, токи двигателя при соединении обмоток статора в «треугольник» и «звезду», вращающий момент $M_{ном}$ и скольжение $s_{ном}$, если частота тока $f=50$ Гц.

10.55. Трехфазный десятиполюсный асинхронный двигатель с фазным ротором имеет следующие данные: номинальная мощность $P_2=45$ кВт, номинальное напряжение 220/380 В, номинальная частота вращения $n_2=574$ об/мин, номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi=0{,}74$ и номинальный КПД $\eta=86{,}0\%$. Вычислить мощность P_1, подводимую к двигателю, токи двигателя при соединении обмоток статора в «треугольник» и «звезду», вращающий момент $M_{ном}$ и скольжение $s_{ном}$, если частота тока в статоре $f=50$ Гц.

10.56*. Короткозамкнутый трехфазный асинхронный двигатель ВАМП-52-8 имеет следующие паспортные данные: $P_2=7{,}5$ кВт, $n_2=660$ об/мин, $U=380/660$ В, $I_1=230/13{,}3$ А, $K_I=6{,}5$, $\eta=71\%$. Определить число пар полюсов двигателя, скольжение и пусковой ток $I_п$ для случаев соединения обмоток статора в «треугольник» и «звезду», номинальный вращающий момент и потребляемую мощность.

10.57. Краново-металлургический трехфазный электродвигатель переменного тока с фазным ротором имеет следующие паспортные данные: мощность $P_2=22$ кВт, напряжение $U=380/220$ В, частота вращения $n_2=960$ об/мин, коэффициент мощности $\cos\varphi=0{,}73$, кратность максимального момента $\lambda=2{,}8$. Определить критическое скольжение, число оборотов при максимальном моменте, номинальный и максимальный вращающие моменты.

10.58*. Трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором серии АО2 пятого габарита с удлиненным ротором имеют технические данные, представленные в табл. 10.1.

Таблица 10.1

Тип электродвигателя	Мощность P, кВт	Частота вращения n, об/мин	КПД η, %	$\cos\varphi$	$\frac{I_п}{I_{ном}}$	$\frac{M_{max}}{M_{ном}}$	$\frac{M_п}{M_{ном}}$
АО2-52-2	13,0	2900	88,0	0,90	5,0	2,2	1,2
АО2-52-4	10,0	1450	88,5	0,87	5,0	2,0	1,4
АО2-52-6	7,5	970	87,0	0,82	5,0	1,8	1,3
АО2-52-8	5,5	725	85,0	0,72	5,0	1,7	1,2

Определить число пар полюсов, частоту вращения магнитного поля, скольжение, мощность, потребляемую двигателем из сети, номинальный вращающий момент, максимальный вращающий момент, пусковой момент, номинальный и пусковой токи двигателя при соединении обмотки статора в «звезду». Двигатели рассчитаны на напряжение 220/380 В. Можно ли осуществить пуск двигателя при полной его нагрузке, когда подводимое напряжение снижено на 10%?

10.59*. Четырехполюсный асинхронный взрывонепроницаемый рудничный электродвигатель ЭДКОФ-33/4 имеет следующие паспортные данные: мощность $P_2=30$ кВт, номинальное напряжение $U=660/380$ В,

номинальная частота вращения $n_2=1465$ об/мин, номинальный КПД $\eta=88{,}5\%$, номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi=0{,}85$, кратность по току $K_I=6{,}5$, кратность по моменту $K_M=2{,}3$, перегрузочная способность двигателя $\lambda=3{,}2$. Определить потребляемые мощности и пусковой ток при соединении обмоток статора в «звезду» и «треугольник», номинальный, пусковой и максимальный моменты.

10.60*. Трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, предназначенные для привода машин и механизмов во взрывоопасных помещениях, имеют паспортные данные, представленные в табл. 10.2.

Таблица 10.2

Тип электродвигателя	Мощность P, кВт	Напряжение U, В	Частота вращения n, об/мин	Линейный ток $I_л$, А	КПД η, %	$\cos\varphi$	$\frac{M_п}{M_{ном}}$	$\frac{M_{max}}{M_{ном}}$	$\frac{I_п}{I_{ном}}$
ВАО42-2	7,5	660/380	2900	8,5/15,2	85,5	0,88	1,6	2,2	7
ВАО51-4	7,5	660/380	1460	8,7/15,1	88	0,86	1,4	2,2	6,5
ВАО52-6	7,5	660/380	970	9,6/16,7	85,5	0,80	1,3	2,2	6,5
ВАО52-8	8,5	660/380	730	12/20,5	85,5	0,73	1,5	2,2	6

Определить потребляемую мощность, число полюсов, номинальное и критическое скольжение, номинальный, пусковой и максимальный вращающие моменты, пусковой ток, число оборотов при максимальном вращающем моменте.

10.61*. Асинхронные трехфазные двигатели имеют паспортные данные, представленные в табл. 10.3.

Таблица 10.3

Тип электродвигателя	Мощность P, кВт	Частота вращения n, об/мин	Напряжение U, В	КПД η, %	$\cos\varphi$	$\frac{I_п}{I_{нач}}$	$\frac{M_п}{M_{нач}}$	$\frac{M_{max}}{M_{нач}}$
ЭДКОФ-33/4	30	1465	660/380	88,5	0,85	6,5	2,3	3,2
ЭДКОФ-44/4	37	1475	660/380	89,0	0,86	6,5	2,5	3,0
ЭДКОФ-42/4	45	1475	660/380	89,5	0,86	6,5	2,6	3,2
ЭДКОФ-43/4	55	1475	660/380	89,6	0,86	6,5	2,7	3,0

Определить номинальный и пусковой токи, номинальный, пусковой и максимальный вращающие моменты, сумму потерь, частоту тока ротора при максимальной нагрузке.

10.62*. Асинхронный трехфазный двигатель имеет номинальную мощность $P_2 = 4{,}0$ кВт, КПД $\eta = 85{,}5\%$, $\cos\varphi = 0{,}89$, частоту вращения магнитного поля $n_1 = 3000$ об/мин, ротора $n_2 = 2880$ об/мин. Двигатель включен в сеть переменного тока с напряжением $U = 220$ В по схеме «треугольник». Определить потребляемую мощность, линейный ток, сумму потерь, вращающий момент на валу и скольжение.

10.63*. Трехфазный асинхронный двигатель марки АО2-82-6 включен в сеть переменного тока с напряжением $U = 380$ В и потребляет из сети мощность $P_1 = 43716$ Вт при коэффициенте мощности $\cos\varphi = 0{,}91$. Сумма потерь $\Sigma P = 3716$ Вт, скольжение $s = 2{,}0\%$. Определить мощность на валу, КПД, линейный ток, частоты вращения магнитного поля и ротора.

10.64*. Асинхронный трехфазный двигатель марки АОЛ2-32-6 подключен к сети переменного тока с напряжением $U = 220$ В по схеме «треугольник» и потребляет ток $I_1 = 9{,}24$ А при КПД $\eta = 81{,}0\%$, $\cos\varphi = 0{,}77$; частота вращения ротора $n_2 = 950$ об/мин. Определить потребляемую мощность, мощность на валу, сумму потерь, вращающий момент и частоту вращения магнитного поля.

10.65*. Асинхронный трехфазный двигатель АОЛ2-42-6 при номинальном вращающем моменте $M_{ном} = 39{,}8$ Н·м, частоте вращения $n_2 = 960$ об/мин и $\cos\varphi = 0{,}79$ потребляет мощность $P_1 = 4820$ Вт. Обмотки статора соединены по схеме «треугольник» и подключены к сети переменного тока с напряжением $U = 220$ В. Определить мощность на валу, сумму потерь, КПД, потребляемый ток, скольжение и частоту тока ротора.

10.66*. Асинхронный трехфазный двигатель с короткозамкнутым ротором подключен к сети переменного тока с напряжением $U = 220$ В и соединен по схеме «треугольник». Двигатель потребляет ток $I_1 = 3{,}3$ А при $\cos\varphi = 0{,}68$, КПД $\eta = 70\%$ и скольжения $s = 8{,}5\%$. Частота вращения магнитного поля статора $n = 1000$ об/мин. Определить потребляемую мощность, мощность на валу, сумму потерь, вращающий момент, частоту вращения ротора и частоту тока ротора.

10.67. Асинхронный трехфазный двигатель марки АОЛ2-22-6 подключен к сети переменного тока с напряжением $U = 380$ В по схеме «звезда». Двигатель потребляет мощность $P_1 = 1447$ Вт при $\cos\varphi = 0{,}73$, развивает мощность на валу $P = 1100$ Вт, при этом частота тока ротора $f = 3{,}5$ Гц. Определить линейный ток, КПД, скольжение, частоту вращения магнитных полей статора и ротора.

10.68. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором включен в сеть переменного тока с напряжением $U = 380$ В. Обмотки статора соединены по схеме «звезда». Двигатель при КПД $\eta = 87{,}5\%$, $\cos\varphi = 0{,}81$ и скольжении $s = 0{,}033$ развивает вращающий момент $M = 131{,}7$ Н·м. Синхронная частота вращения магнитного поля $n_1 = 750$ об/мин. Определить сумму потерь, линейный ток и частоту тока ротора.

10.69*. Асинхронный трехфазный двигатель с короткозамкнутым ротором подключен к сети переменного тока с напряжением $U = 380$ В. Обмотки статора соединены по схеме «звезда». При номинальном вращающем моменте $M = 653$ Н·м и $\cos\varphi = 0{,}82$ ротор развивает частоту вращения $n_2 = 585$ об/мин. Сумма потерь двигателя составляет 4,2 кВт. Определить КПД, номинальный линейный ток и частоту тока ротора.

10.70. Определить потребляемый ток, КПД и частоту тока ротора трехфазного шестиполюсного асинхронного двигателя, подключенного к сети переменного тока с напряжением $U = 380$ В. Обмотки статора соединены по схеме «звезда». При номинальном вращающем моменте $M = 216{,}6$ Н·м частота вращения $n_2 = 970$ об/мин и $\cos\varphi = 0{,}9$, сумма потерь $\sum P = 2{,}3$ кВт.

10.71. Определить вращающий момент и частоту тока ротора трехфазного асинхронного двигателя, подключенного к сети переменного тока с напряжением $U = 220$ В и потребляющего ток $I_1 = 306{,}3$ А, при $\cos\varphi = 0{,}92$, скольжении $s = 0{,}02$ и частоте вращения магнитного поля $n_1 = 1500$ об/мин. Сумма потерь двигателя $\sum P = 7526$ Вт. Обмотки статора соединены по схеме «звезда».

10.72*. Асинхронный трехфазный двигатель с короткозамкнутым ротором, обмотки которого соединены по схеме «треугольник» и подключены к сети переменного тока с напряжением $U = 220$ В, потребляет при КПД $\eta = 87\%$ и $\cos\varphi = 0{,}82$ ток $I_1 = 27$ А. Частоты вращения магнитного поля $n_1 = 1000$ об/мин, ротора $n_2 = 970$ об/мин. Определить сумму потерь, вращающий момент, число пар полюсов и скольжение.

10.73*. Шестиполюсный трехфазный асинхронный двигатель при КПД $\eta = 88\%$, $\cos\varphi = 0{,}89$ и скольжении $s = 3\%$ потребляет ток $I = 43{,}5$ А. Обмотки статора соединены по схеме «треугольник» и подсоединены к сети переменного тока с напряжением $U = 220$ В. Определить сумму потерь и вращающий момент на валу двигателя.

10.74*. Асинхронный трехфазный двигатель с короткозамкнутым ротором марки АОЛ2-22-2 включен в сеть переменного тока с напряжением $U = 380$ В по схеме «звезда». При номинальном вращающем моменте на валу $M_{ном} = 7{,}34$ Н·м развивает частоту вращения $n_2 = 2860$ об/мин. Номинальный КПД $\eta = 83{,}0\%$, $\cos\varphi = 0{,}89$. Определить потребляемую мощность, мощность на валу, сумму потерь, линейный ток, частоту вращения магнитного поля и скольжение.

10.75*. Асинхронный трехфазный двигатель марки АОЛ2-12-2 включен в сеть переменного тока с напряжением $U = 220$ В по схеме «треугольник» и потребляет ток $I_1 = 4{,}17$ А. При номинальной мощности на валу $P = 1{,}1$ кВт развивает частоту вращения $n = 2815$ об/мин. Сумма потерь $\sum P = 283$ Вт. Определить потребляемую мощность, КПД, $\cos\varphi$, вращающий момент на валу, скольжение и частоту вращения магнитного поля.

10.76*. Определить сумму потерь, скольжение и вращающий момент на валу трехфазного асинхронного двигателя, если он имеет следующие характеристики: потребляемый ток $I_1 = 14{,}0$ А, частота вращения магнитного поля $n_1 = 750$ об/мин, частота вращения ротора $n_2 = 720$ об/мин, КПД $\eta = 80\%$, $\cos\varphi = 0{,}7$. Обмотки статора соединены по схеме «треугольник» и подключены к сети переменного тока с напряжением $U_ф = 220$ В.

10.77*. Восьмиполюсный трехфазный асинхронный двигатель, обмотки которого соединены по схеме «звезда», подключен к сети переменного тока с напряжением $U = 380$ В. При номинальной мощности на валу $P_1 = 5500$ Вт, вращающем моменте $M = 72{,}5$ Н·м и $\cos\varphi = 0{,}72$ сумма потерь $\sum P = 970$ Вт. Определить потребляемый ток, КПД и скольжение.

10.78*. Для асинхронного двигателя с фазным ротором рассчитать сопротивление пускового реостата, включаемого в цепь ротора для обеспечения максимального пускового момента, если активное

сопротивление ротора $R_2 = 0{,}02$ Ом, номинальное скольжение $s_{ном} = 0{,}04$, критическое скольжение $s_{кр} = 0{,}22$.

10.79*. Определить сопротивление, необходимое для включения в цепь фазного ротора, чтобы начальный пусковой момент, развиваемый двигателем, составил 780 Н·м при номинальной мощности $P = 70$ кВт, номинальной частоте вращения $n_{ном} = 955$ об/мин, критическом скольжении $s_{кр} = 12\%$ и сопротивлении фазы ротора $R_2 = 0{,}06$ Ом.

10.80*. Асинхронный двигатель с фазным ротором типа МТ-42-8 имеет следующие паспортные данные: $P_{ном} = 16$ кВт, $n_{ном} = 720$ об/мин, КПД $\eta = 82{,}5\%$, $\lambda = 3$, номинальный ток ротора $I_{2ном} = 46{,}3$ А, сопротивление фазы ротора $R_2 = 0{,}123$ Ом. Определить сопротивление, необходимое для включения в цепь ротора, чтобы при номинальном вращающем моменте на валу двигатель имел скольжение $s = 0{,}6$.

10.81. Определить сопротивление, которое необходимо включить в цепь фазного ротора шестиполюсного асинхронного двигателя, чтобы при номинальном вращающем моменте на валу частота вращения ротора составляла 400 об/мин при номинальном скольжении $s = 5\%$ и сопротивлении обмотки ротора $R_2 = 0{,}04$ Ом.

10.82*. Найти сопротивление, включаемое в цепь фазного ротора асинхронного двигателя и необходимое для получения при номинальном вращающем моменте частоты вращения $n = 700$ об/мин, если известны номинальная частота вращения $n_1 = 950$ об/мин и сопротивление обмотки ротора $R = 0{,}08$ Ом.

10.83. Определить частоту вращения асинхронного трехфазного двигателя с фазным ротором при номинальном вращающем моменте на валу, если в цепь ротора включено дополнительное сопротивление $R_д = 0{,}45$ Ом. Сопротивление фазы обмотки ротора $R_2 = 0{,}15$ Ом, число пар полюсов $p = 3$, номинальное скольжение $s_{ном} = 10\%$.

10.84. Какое количество полюсов должно быть у синхронного генератора (СГ), имеющего частоту генерируемого тока $f = 50$ Гц, если ротор вращается с частотой $n = 125$ об/мин?

10.85. Число пар полюсов синхронного генератора $p = 16$. Определить частоту вращения магнитного поля статора, если частота генерируемого тока $f = 50$ Гц.

10.86. Генератор переменного тока имеет 32 пары полюсов и вращается с частотой $f=750$ об/мин. Определить частоту переменного тока.

10.87. Определить число пар полюсов синхронного гидрогенератора СВФ, вырабатывающего энергию переменного тока с частотой $f=50$ Гц, если частота вращения ротора $n=68{,}2$ об/мин.

10.88. Найти ЭДС, индуцируемую в фазе статора генератора переменного тока при холостом ходе, если $w_1=115$, $K_{o1}=0{,}9$, $f=50$ Гц, а $\Phi_m=0{,}01$ Вб.

10.89. При магнитном потоке $\Phi_m=0{,}02$ Вб в фазе обмотки статора при холостом ходе синхронного генератора индуцируется ЭДС $E=400$ В с частотой $f=50$ Гц. Каково число витков одной фазы статора, если обмоточный коэффициент $K_{o1}=0{,}938$?

10.90. Фазное напряжение однофазного синхронного генератора $U_\Phi=6300$ В, а фазный ток 2,5 А. Определить полезную мощность P_2, если угол сдвига фаз между током и напряжением $\cos\varphi=0{,}8$.

10.91. Определить ЭДС синхронного генератора в режиме холостого хода, если известны его паспортные данные: число последовательно соединенных витков $w_1=226$, обмоточный коэффициент $K_{o1}=0{,}8$, частота вращения $n_1=1500$ об/мин, число пар полюсов $p=2$, обмотка возбуждения создает магнитный поток $\Phi_m\cong 0{,}01$ Вб.

10.92. Найти КПД, синхронного генератора, если суммарная мощность потерь $\sum P=6\%$ от полезной мощности, отдаваемой генератором.

10.93. Суммарная мощность потерь в синхронном двигателе $\sum P=36{,}6$ кВт. Какую мощность потребляет двигатель от сети, если его КПД $\eta=94{,}5\%$?

10.94. Трехфазный синхронный двигатель имеет следующие номинальные характеристики: $P_{2\text{ном}}=100$ кВт, $U=380$ В, $f=50$ Гц, КПД $\eta=0{,}8$, число полюсов 2, $\cos\varphi=1$. Обмотки соединены в «звезду». Определить номинальный ток и вращающий момент.

10.95*. Синхронный генератор СГН-14-36-12 имеет следующие паспортные данные: мощность $s=500$ кВ·А, напряжение $U=6{,}3$ кВ, коэффициент мощности $\cos\varphi=0{,}9$, КПД $\eta_{\text{ном}}=92{,}4\%$. Определить номинальную активную мощность, сумму потерь и ток синхронного генератора при номинальной нагрузке.

10.96. Определить номинальный ток синхронного двигателя при включении по схемам «звезда» и «треугольник», если двигатель имеет следующие паспортные данные: мощность $s=120$ кВ·А; напряжение $U=660/380$ В, КПД $\eta_{\text{ном}}=0{,}88$, коэффициент мощности $\cos\varphi=0{,}9$.

10.97*. Определить частоту вращения, номинальный вращающий момент, ток и потребляемую мощность восьмиполюсного синхронного двигателя марки СД102, имеющего следующие номинальные характеристики: $P_{\text{ном}}=75$ кВт, $U_{\text{ном}}=380$ В, $\cos\varphi_{\text{ном}}=0{,}9$, КПД $\eta_{\text{ном}}=96\%$.

10.98. Найти электрические потери в статоре и электромагнитную мощность синхронного генератора, который при симметричной нагрузке отдает полезную мощность $P=250$ кВт; фазный ток $I_\Phi=300$ А; активное сопротивление фазы обмотки статора $R=0{,}12$ Ом.

10.99. Определить число пар полюсов, вращающий момент и ток гидрогенератора ГЭС, имеющего следующие паспортные данные: мощность $P_{\text{ном}}=500$ МВт, напряжение $U_{\text{ном}}=15\,750$ В, $\cos\varphi=0{,}85$, КПД $\eta=98{,}2\%$, частота вращения $n=93{,}8$ об/мин.

10.100. Трехфазный синхронный двигатель, обмотки которого соединены в «звезду», имеет активное и синхронное индуктивное сопротивления на фазу, соответственно равные $R=1$ Ом и $X=10$ Ом. Вычислить мощность, подводимую к двигателю, и ЭДС при коэффициенте мощности $\cos\varphi=0{,}8$, если напряжение на зажимах двигателя $U=11\,000$ В, а ток двигателя $I=60$ А.

КАЧЕСТВЕННЫЕ ЗАДАЧИ

10.101. Определить частоту вращения магнитного поля асинхронного двигателя, подключенного к сети переменного тока с частотой $f=50$ Гц, при шести полюсах статора.

10.102. На какие синхронные частоты вращения магнитного поля изготовляют асинхронные двигатели серий 4А и А2? От чего зависят эти частоты?

10.103. Какое число полюсов должен иметь асинхронный двигатель, питающийся от сети переменного тока с частотой $f=50$ Гц, при частоте вращения магнитного поля $n=1000$ об/мин?

10.104. Число пар полюсов синхронного генератора $p=6$. Определить частоту вращения магнитного поля статора, если частота тока $f=50$ Гц.

10.105. Определить скольжение двигателя марки 4А80А6, если известно, что частота вращения ротора отстает от частоты вращения магнитного поля на 50 об/мин.

10.106. Какую максимальную частоту вращения может иметь вращающееся магнитное поле асинхронного двигателя при частоте переменного тока $f=50$ Гц?

10.107. Определить число пар полюсов и частоту вращения магнитного поля асинхронного двигателя, если известно, что в обмотке статора имеется 15 катушек, критическое скольжение $s_{кр}=15\%$, синхронная частота вращения $n_1=1000$ об/мин.

10.108. Указать, каким способом регулирования частоты вращения асинхронных двигателей можно изменять частоту вращения ротора кратно 1:2:4.

10.109. При регулировании частоты вращения асинхронного двигателя были получены следующие частоты вращения: 1500, 1000, 750 об/мин. Каким способом осуществлялось регулирование частоты вращения?

10.110. При регулировании частоты вращения асинхронного трехфазного двигателя с короткозамкнутым ротором были получены следующие частоты вращения: 1450, 1425, 1400 и 1375 об/мин. Каким способом осуществлялось регулирование частоты вращения?

10.111. На сколько изменится частота вращения ротора при переключении обмотки статора с двух пар на три пары полюсов?

10.112. Какое количество катушек имеет статорная обмотка четырехполюсного асинхронного двигателя?

10.113. Определить число полюсов и катушек у статорной обмотки асинхронного трехфазного двигателя, имеющего номинальную частоту вращения $n=725$ об/мин.

10.114. Статор трехфазного асинхронного двигателя 4А112М2 имеет 24 паза. Сколько пазов приходится на одно полюсное деление?

10.115. Определить, на сколько электрических и пространственных градусов смещены оси катушек двух соседних фаз статорной обмотки трехфазного асинхронного двигателя, имеющего четыре полюса.

10.116. Статор трехфазного асинхронного двигателя имеет 18 пазов. Определить, сколько пазов

приходится на полюс и фазу, если частота вращения магнитного поля $n=3000$ об/мин при частоте $f=50$ Гц.

10.117. Возрастает или понижается частота вращения магнитного поля при увеличении числа пар полюсов асинхронного трехфазного двигателя?

10.118. Сколько оборотов совершит вращающееся магнитное поле трехфазного двигателя за один период переменного тока, если статорная обмотка имеет две пары полюсов?

10.119. Во сколько раз возрастет частота вращающегося магнитного поля статора, если частота переменного тока увеличится в восемь раз?

10.120. Какую максимальную частоту вращения можно получить у асинхронных трехфазных двигателей, если первый подключен к сети переменного тока с частотой $f=50$ Гц, второй — к сети с $f=400$ Гц?

10.121. В каких пределах изменяется частота вращения ротора асинхронного трехфазного двигателя от холостого хода ($s_x=0{,}1\%$) до максимальной нагрузки ($s_{кр}=15\%$).

10.122. Чему равен КПД синхронного генератора, если суммарная мощность потерь $\sum P=7{,}5\%$ от полезной мощности генератора?

10.123. На сколько увеличатся электрические потери двигателя при замене медного обмоточного провода алюминиевым того же сечения и длины если удельное сопротивление меди $\rho=0{,}01760$ Ом·мм^2/м, а алюминия $\rho=0{,}0278$ Ом·мм^2/м?

10.124. Справедлива ли формула $\eta=P_2/P_1$ для КПД асинхронного двигателя, если он работает в режиме, отличающемся от номинального?

10.125. Определить КПД трехфазного двигателя, если постоянные потери $P_x=1{,}5$ кВт, переменные $P_э=3{,}5$ кВт, а потребляемая из сети мощность $P_1=25$ кВт?

10.126. Как опытным путем определить постоянные потери асинхронного двигателя?

10.127. Как определить переменные потери при номинальной нагрузке трехфазного асинхронного двигателя?

10.128. На значение каких потерь отличается электромагнитная мощность от потребляемой, а мощность на валу — от электромагнитной?

10.129. Асинхронный трехфазный двигатель потребляет из сети мощность $P=10$ кВт при КПД $\eta=0{,}8$. Потери холостого хода при этом составляют 0,7 кВт. Определить переменные потери.

10.130. Почему ток холостого хода асинхронного двигателя составляет 25—50%, а трансформатора — 3—10% от номинального тока?

10.131. Как повлияет на ток холостого хода и коэффициент мощности двигателя увеличение воздушного зазора между статором и ротором?

10.132. При каком режиме работы асинхронного двигателя коэффициент мощности самый низкий? Как и почему изменяется $\cos\varphi$ при увеличении нагрузки на валу от нуля до номинального значения?

10.133. Как изменится ток ротора асинхронного двигателя, если частота вращения ротора понизилась?

10.134. Изменится ли ток ротора, если напряжение на обмотке статора уменьшится на 15% по сравнению с номинальным, а отдаваемая мощность двигателя останется без изменения?

10.135. Определить скольжение асинхронного двигателя, если электрические потери $P_э=50$ Вт, а электромагнитная мощность $P_{эм}=1$ кВт?

10.136. При изменении нагрузки скольжение возросло с 2 до 4%. Во сколько раз увеличились электрические потери в роторе?

10.137. Найти номинальную электромагнитную мощность трехфазного асинхронного двигателя, если номинальное скольжение $s_{ном}=4\%$, а электрические потери ротора составляют 250 Вт.

10.138. Во сколько раз увеличатся электрические потери в роторе, если нагрузка трехфазного асинхронного двигателя возрастает от номинального ($s_{ном}=3\%$) до максимального вращающего момента ($s_{кр}=9{,}9\%$)?

10.139. Можно ли в асинхронных двигателях с короткозамкнутым и фазным роторами изменять скольжение для регулирования частоты вращения?

10.140. Во сколько раз уменьшится пусковой ток асинхронного двигателя, если пуск производится переключением статорных обмоток со «звезды» на «треугольник»?

10.141. Объяснить, почему при пуске асинхронного двигателя, когда ЭДС и ток в роторе максимальны, не развивается максимальный вращающий момент.

10.142. Как влияет изменение скольжения на вращающий момент и КПД асинхронного двигателя?

10.143. Указать ориентировочно, во сколько раз максимальный вращающий момент превышает номинальный момент в асинхронных двигателях серий А2 и 4А.

10.144. Как повлияет на частоту вращения и вращающий момент асинхронного двигателя понижение номинального напряжения на 10%?

10.145. На сколько процентов увеличится максимальный вращающий момент асинхронного двигателя при повышении напряжения на 10% по сравнению с номинальным значением?

10.146. Обмотку статора асинхронного двигателя, обычно включаемую в «треугольник», ошибочно соединили в «звезду» и подключили к той же сети. Во сколько раз уменьшатся ток и номинальный и вращающий момент?

10.147. На сколько процентов уменьшится начальный пусковой момент, если напряжение на обмотке статора уменьшится на 20% по сравнению с номинальным значением?

10.148. Во сколько раз понизится перегрузочная способность асинхронного трехфазного двигателя при понижении напряжения в два раза?

10.149. Может ли трехфазный асинхронный двигатель при наличии трех пар полюсов и критическом скольжении $s_{кр}=12\%$ иметь частоту вращения $n=860$ об/мин?

10.150. При работе трехфазного двигателя отключился один из линейных проводов. Будет ли вращаться ротор двигателя, если нагрузка на валу составляет 50% номинального значения? На сколько возрастет линейный ток, если нагрузка на валу останется прежней?

10.151. Можно ли получить вращающееся магнитное поле в двигателе, имеющем две катушки и подключенном к однофазной сети переменного тока?

10.152. Для чего последовательно с пусковой обмоткой однофазного конденсаторного двигателя включают конденсатор?

10.153. На сколько электрических градусов сдвигают в пространстве пусковую обмотку однофазного асинхронного двигателя относительно главной обмотки?

10.154. В сети, питающей асинхронный трехфазный двигатель, напряжение уменьшили в два раза, а частоту увеличили в 1,5 раза. Уменьшится или увеличится частота вращения ротора, если двигатель работает в режиме холостого хода?

10.155. На сколько электрических и пространственных градусов перемещается вращающееся магнитное поле за каждый период переменного тока в трехфазном двигателе, имеющем три пары полюсов?

10.156. Как изменится скольжение, если напряжение на обмотке статора увеличится на 10% по сравнению с номинальным значением?

10.157. Определить ЭДС, наводимую в одном витке статорной обмотки трехфазного асинхронного двигателя, если известно, что частота $f=50$ Гц, а магнитный поток $\Phi_m=0{,}01$ Вб.

10.158. Изменится ли ЭДС обмоток статора, если частота подводимого напряжения возрастет в два раза?

10.159. Определить наибольшую частоту переменной ЭДС, наводимую в обмотках ротора, если критическое скольжение двигателя $s_{кр}=20\%$, а частота тока в сети $f=50$ Гц.

10.160. В неподвижном роторе двигателя индуцируется ЭДС $E=20$ В. Чему равна ЭДС во вращающемся роторе при скольжении $s=5\%$.

10.161. В каком случае частота тока ротора будет больше: в неподвижном или вращающемся роторе?

10.162. Как изменятся скольжение, частота тока ротора и ЭДС обмоток ротора: а) от момента запуска двигателя до набора оборотов холостого хода; б) при изменении нагрузки на валу от 0 до $M_{ном}$?

10.163. Чему равна сумма потерь асинхронного двигателя при КПД $\eta=0{,}9$, если он потребляет мощность $P=20$ кВт?

10.164. Почему потери в стали ротора меньше потерь в стали статора?

10.165. Трехфазный двигатель подготовили для работы от однофазной сети. Изменится ли номинальная мощность двигателя при таком питании?

10.166. Как осуществляется реверсирование, т. е. изменение направления вращения ротора, асинхронного трехфазного двигателя и однофазного конденсаторного двигателя?

10.167. Определить частоту вращения ротора синхронного двигателя, имеющего три пары полюсов и включенного в сеть переменного тока промышленной частоты.

10.168. С какой частотой вращается ротор синхронного генератора, имеющего четыре полюса и частоту сети $f=400$ Гц?

10.169. Определить, какой из двух двигателей асинхронный, а какой — синхронный, если первый имеет частоту вращения $n=700$ об/мин, а второй $n=750$ об/мин?

10.170. С какой частотой и в какую сторону вращается магнитное поле статора, если ротор синхронного генератора вращается по часовой стрелке с частотой $n=500$ об/мин?

10.171. У синхронного трехфазного двигателя нагрузка на валу уменьшилась в три раза. Изменится ли частота вращения ротора?

10.172. С какой частотой вращается магнитное поле обмоток статора синхронного генератора, если в его обмотках индуцируется ЭДС частотой $f=50$ Гц, а индуктор имеет четыре полюса?

Глава 11

ЭЛЕКТРОПРИВОД И АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ И УРАВНЕНИЯ

Мощность электродвигателя для продолжительного режима работы с постоянной нагрузкой выбирают из условия

$$P_{дв} \geqslant P_{мх}, \qquad (11.1)$$

где $P_{дв}$ — мощность двигателя, Вт; $P_{мх}$ — расчетная мощность механизма, Вт.

Мощность электродвигателя для продолжительного режима с переменной нагрузкой выбирают методом эквивалентных:

тока

$$I_{эк}=\sqrt{\sum I^2 t/\sum t}; \qquad (11.2)$$

момента

$$M_{эк}=\sqrt{\sum M^2 t/\sum t}; \qquad (11.3)$$

мощности

$$P_{эк}=\sqrt{\sum P^2 t/\sum t}, \qquad (11.4)$$

где I, M, P — ток, А; момент, Н·м; мощность, Вт за рабочий цикл электродвигателя; t — время работы электродвигателя, с.

Максимальный момент двигателя постоянного тока

$$M_{max}=\lambda M_{ном}=\lambda\frac{9{,}55P_{2ном}}{n_{2ном}}. \qquad (11.5)$$

Максимальный момент асинхронного двигателя определяется с учетом возможного снижения напряжения в сети на 10%:

$$M_{max}=0{,}81\lambda M_{ном}=0{,}81\lambda\frac{9{,}55P_{2ном}}{n_{2ном}}, \qquad (11.6)$$

где $M_{ном}$ — номинальный момент двигателя, Н·м; $n_{2ном}$ — номинальная частота вращени вала, об/мин; λ — перегрузочная способность двигателя.

Выбор мощности двигателя для повторно-кратковременного режима работы производят в соответствии с формулой

$$P_{ст}=P_{эк}\sqrt{ПВ_1/ПВ_{ст}},$$

где $P_{эк}$ — эквивалентная мощность, Вт; $ПВ_1$ — действительная, $ПВ_{ст}$ — стандартная продолжительность включения.

Продолжительность включения

$$ПВ=\frac{t_р}{t_р+t_0}=\frac{t_р}{t_ц}, \qquad (11.7)$$

или

$$ПВ\%=\frac{t_р}{t_р+t_0}100\%=\frac{t_р}{t_ц}100\%, \qquad (11.8)$$

где $t_р$ — время работы двигателя, с; t_0 — продолжительность пауз, с; $t_ц$ — время цикла (общее время работы двигателя и паузы), с.

Стандартные продолжительности включения ПВ = 15, 25, 40, 60% при продолжительности цикла не более 10 мин.

При использовании двигателей в повторно-кратковременном режиме работы предварительно определяют мощность при стандартной продолжительности включений, равной 15, 25, 40, 60%:

$$P_{эк}=P_{мх}\sqrt{ПВ_{ст}}. \qquad (11.9)$$

В этом случае при $ПВ_{ст}=25\%$ двигатель можно нагрузить на двойную мощность, а при $ПВ_{ст}=40\%$ — на $1{,}58P_{ном}$. После этого производят перерасчет на стандартную продолжительность включения.

Наивыгоднейшее передаточное число с большим числом включения в единицу времени определяют по наименьшему значению произведения махового момента mD^2 на квадрат передаточного отношения u^2:

$$mD^2u^2=\min. \qquad (11.10)$$

Маховой момент находят из уравнения

$$mD^2=4J, \qquad (11.11)$$

где m — масса, кг; D — диаметр, м; J — момент инерции, кг·м^2.

Передаточное отношение — это отношение частоты вращения двигателя ($n_{дв}$) к частоте вращения барабана лебедки ($n_б$):

$$u=n_{дв}/n_б. \qquad (11.12)$$

Расчетная мощность для привода центробежного вентилятора

$$P=QH/\eta, \qquad (11.13)$$

где Q — расход газа, м^3/с; H — давление газа, Н/м^2; η — КПД передачи и вентилятора (0,4—0,75).

Расчетная мощность для привода насоса

$$P=\frac{\gamma Q(H+\Delta H)}{\eta}, \qquad (11.14)$$

где γ — удельная масса, Н/м^3; Q — производительность, м^3/с; H — высота напора, м; ΔH — падение напора в магистралях, м.

Мощность подъемного устройства при подъеме груза:

а) без противовеса

$$P=\frac{(G+G_0)v}{\eta}; \qquad (11.15)$$

б) с противовесом

$$P=\frac{(G+G_0-G_{пр})v}{\eta}, \qquad (11.16)$$

где G — масса полезного груза, Н; G_0 — масса захватывающих приспособлений и пр., Н; $G_{пр}$ — масса противовеса, Н; v — скорость подъема, м/с; η — КПД.

Мощность двигателей для перемещения лент конвейеров, транспортеров и т. д.

$$P=Fv/\eta, \qquad (11.17)$$

где F — тяговое усилие, Н; v — скорость, м/с; η — КПД механизма и редуктора.

ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ С РЕШЕНИЯМИ

11.1. Выбрать двигатель для электропривода центробежного вентилятора, создающего давление газа $H=76$ Н/м^2 при его расходе $Q=15$ м^3/с, КПД вентилятора 0,55.

Решение. Определяем мощность, необходимую для приведения в действие вентилятора:

$$P=QH/\eta=15\cdot 76/0{,}55=2072 \text{ Вт}.$$

Мощность электродвигателя при продолжительном режиме выбирают из условия $P_{дв}\geqslant P_{мх}$. Используя каталог асинхронных двигателей, выбираем двигатель мощностью 2,2 кВт.

11.2. Насос, работающий в продолжительном режиме, имеет следующие паспортные данные: производительность $Q=0{,}5$ м^3/с, напор $H=8{,}2$ м; частота вращения $n=950$ об/мин; КПД $\eta=0{,}6$ и удельная масса жидкости $\gamma=1000$ Н/м^3. Выбрать электродвигатель переменного тока.

Решение. Мощность, развиваемая насосом,

$$P=\frac{\gamma QH}{\eta}=\frac{1000\cdot 0{,}5\cdot 8{,}2}{0{,}6}=6833{,}3 \text{ Вт}.$$

Мощность двигателя при продолжительном режиме должна быть равна или немного больше мощности производственного механизма. В соответствии с условиями задачи выбираем двигатель марки АО2-52-6 мощностью 7,5 кВт и частотой вращения $n=970$ об/мин.

11.3. Выбрать асинхронный двигатель для вентилятора, если при частоте вращения $n=475$ об/мин вращающий момент $M=10$ Н·м. Номинальная частота вращения вентилятора $n=950$ об/мин, а зависимость момента вентилятора от частоты вращения задана уравнением $M_2=M_1(n_2/n_1)^2$.

Решение. Определяем момент, необходимый для вращения, при номинальной частоте вращения: $M_2=M_1(n_2/n_1)^2=10(950/475)^2=40$ Н·м.

Мощность двигателя

$$P=\frac{Mn}{9{,}55}=\frac{40\cdot 950}{9{,}55}=4000 \text{ Вт}=4 \text{ кВт}.$$

По каталогу выбираем двигатель марки АО2-42-6 мощностью 4 кВт и частотой вращения $n=960$ об/мин.

11.4. Металлообрабатывающий автомат приводится во вращение двигателем постоянного тока параллельного возбуждения. Напряжение питания двигателя $U=220$ В, частота вращения $n=3000$ об/мин. График изменения тока в двигателе задан в табл. 11.1.

Таблица 11.1

Ток, А	40	30	20	40	30	20
Время, с	120	180	300	120	180	300

Подобрать двигатель из серии П, который обеспечит работу автомата.

Решение. Эквивалентный ток двигателя

$$I_{эк}=\sqrt{\frac{\sum I^2t}{\sum t}}=\sqrt{\frac{40^2\cdot 120+30^2\cdot 180+20^2\cdot 300}{120+180+300}}=28 \text{ А}.$$

Эквивалентная мощность двигателя

$$P_{эк}=UI_{эк}=220\cdot 28=6160 \text{ Вт}.$$

Для продолжительного режима мощность двигателя находим из условия $P_{дв}\geqslant P_{мх}$. По каталогу выбираем двигатель П42, имеющий мощность $P=8$ кВт, напряжение $U=220$ В, частоту вращения $n=3000$ об/мин, КПД $\eta=0{,}83$, номинальный ток $I_{ном}=43{,}5$ А. Номинальный ток двигателя превышает максимальное значение тока при нагрузке, что предохраняет двигатель от перегрева.

11.5. Выбрать двигатель постоянного тока для подъемного механизма, работающего в повторно-кратковременном режиме, из двигателей, работающих в продолжительном режиме, если цикл продолжается 135 с и имеет следующие рабочие отрезки времени:

1) $M_1 = 500$ Н·м, $t_1 = 5$ с;
2) $M_2 = 225$ Н·м, $t_2 = 20$ с;
3) $M_3 = 150$ Н·м, $t_3 = 5$ с;
4) $M_4 = 50$ Н·м, $t_4 = 15$ с.

Необходимая частота вращения двигателя $n = 740$ об/мин, напряжение $U = 220$ В.

Решение. Эквивалентный момент механизма

$$M_{эк} = \sqrt{\frac{\sum M^2 t}{\sum t}} = \sqrt{\frac{500^2 \cdot 5 + 225^2 \cdot 20 + 150^2 \cdot 5 + 50^2 \cdot 15}{5+20+5+15}} =$$

$$= 231{,}5 \text{ Н·м}.$$

Эквивалентная мощность

$$P_{эк} = \frac{M_{эк} n}{9{,}55} = \frac{231{,}5 \cdot 740}{9{,}55} = 17{,}9 \text{ кВт}.$$

Продолжительность включения

$$\text{ПВ}\% = \frac{t_р}{t_ц} 100\% = \frac{5+20+5+15}{135} 100\% = 33\%.$$

Мощность двигателя продолжительного режима при ПВ = 25%

$$P_{ст\ эк} = P_{эк} \sqrt{0{,}25} = 17{,}9 \cdot 0{,}5 = 8{,}95 \text{ кВт}.$$

Пересчитаем на $\text{ПВ}_1 = 33\%$:

$$P_{дв} = P_{ст\ эк} \sqrt{\text{ПВ}/\text{ПВ}_{ст}} = 8{,}95 \sqrt{0{,}33/0{,}25} = 10{,}28 \text{ кВт}.$$

По каталогу выбираем двигатель П72. Его паспортные данные:

$P_{ном} = 11$ кВт, $n = 750$ об/мин, $\eta = 81\%$, $\lambda = 3$.

Номинальный момент двигателя

$$M_{ном} = \frac{9{,}55 P_{ном}}{n} = \frac{9{,}55 \cdot 11\,000}{750} = 140 \text{ Н·м}.$$

Отсюда максимальный момент $M_{max} = \lambda M_{ном} = 3{,}0 \cdot 140 \approx 420$ Н·м. Противодействующий момент механизма превышает момент двигателя:

$$\Delta M = M_{дв} - M_{мх} = 420 - 500 = -80 \text{ Н·м}.$$

Двигатель не подходит по перегрузочной способности.

Выбираем двигатель П81 мощностью $P_{ном} = 14$ кВт. Его паспортные данные: частота вращения $n_{ном} = 750$ об/мин, КПД $\eta = 80{,}5$, коэффициент нагрузки $\lambda = 3$.

Производим проверку на перегрузочную способность:

$$M_{max} = \lambda M_{ном} = \lambda \frac{9{,}55 P_{ном}}{n} = \frac{3 \cdot 9{,}55 \cdot 14\,000}{750} = 534{,}8 \text{ Н·м},$$

$$\Delta M = M_{дв} - M_{мх} = 534{,}8 - 500 = 34{,}8 \text{ Н·м}.$$

Двигатель подходит по перегрузочной способности.

11.6. Определить наиболее выгодное передаточное отношение редуктора из условия минимального общего времени переходных процессов для электропривода станка, работающего в диапазоне частот вращения от 20 до 187 об/мин при максимальной мощности $P_{max} = 4{,}2$ кВт.

Решение. Наиболее выгодное передаточное отношение редуктора получается при наименьшем произведении махового момента двигателя на квадрат передаточного отношения: mD^2u^2. Сопоставляя данные двигателей постоянного тока с различными частотами вращения 600, 750, 1000, 1500, 3000 об/мин и мощностью $P = 4{,}5$ кВт, определяем наименьшее произведение: mD^2u^2. Вначале вносим в табл. 11.2 (гр. 1, 2, 3, 4) паспортные данные двигателей, после чего определяем передаточные отношения:

$$u_1 = n_{дв}/n_{мх} = 3000/187 = 16;$$
$$u_2 = n_{дв}/n_{мх} = 1500/187 = 8;$$
$$u_3 = n_{дв}/n_{мх} = 1000/187 = 5{,}3;$$
$$u_4 = n_{дв}/n_{мх} = 750/187 = 4.$$

Далее находим квадрат передаточного отношения $u_1^2 = 256$, $u_2^2 = 64$, $u_3^2 = 28{,}49$, $u_4^2 = 16$.

Определяем момент по известному моменту инерции:

$$mD_1^2 = 4J_1 = 4{,}0 \cdot 0{,}026 = 0{,}106 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$
$$mD_2^2 = 4J_2 = 4{,}0 \cdot 0{,}045 = 0{,}18 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$
$$mD_3^2 = 4J_3 = 4{,}0 \cdot 0{,}1 = 0{,}4 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$
$$mD_4^2 = 4J_4 = 4{,}0 \cdot 0{,}14 = 0{,}56 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Находим произведения махового момента на квадрат передаточного отношения:

$$mD_1^2 u_1^2 = 0{,}106 \cdot 256 = 26{,}9 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$
$$mD_2^2 u_2^2 = 0{,}18 \cdot 64 = 11{,}52 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$
$$mD_3^2 u_3^2 = 0{,}4 \cdot 28{,}49 = 11{,}4 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$
$$mD_4^2 u_4^2 = 0{,}56 \cdot 16 = 8{,}96 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Полученные данные заносим в табл. 11.2.

Таблица 11.2

Тип двигателя	P, кВт	$n_{ном}$, об/мин	mD^2, кг·м^2	u	u^2	mD^2u^2, кг·м^2
1	2	3	4	5	6	7
П32	4,5	3000	0,106	16	256	26,9
П42	4,5	1500	0,18	8	64	11,52
П52	4,5	1000	0,4	5,3	28,44	11,4
П61	4,5	750	0,56	4	16	8,96

Наиболее выгодное передаточное отношение у двигателя П61.

11.7. Выбрать наиболее выгодное передаточное отношение из условий минимального времени переходного процесса для нерегулируемого электропривода мощностью $P = 7$ кВт и с частотой вращения 250 об/мин.

Решение. Из каталога асинхронных двигателей серии А2 выписываем технические данные двигателей мощностью $P = 7{,}5$ кВт (табл. 11.3).

Таблица 11.3

Тип двигателя	$P_{ном}$, кВт	$n_{ном}$, об/мин	J, кг·м^2
АО2-42-2	7,5	2910	0.025
АО2-51-4	7,5	1450	0.045
АО2-52-6	7,5	970	0.11
АО2-61-8	7,5	725	0.17

Определяем передаточные отношения:

$$u_1 = n_{дв}/n_{мх} = 2910/250 = 11{,}64,$$
$$u_2 = n_{дв}/n_{мх} = 1450/250 = 5{,}8,$$
$$u_3 = n_{дв}/n_{мх} = 970/250 = 3{,}88,$$
$$u_4 = n_{дв}/n_{мх} = 725/250 = 2{,}9.$$

Находим квадрат передаточного отношения:

$$u_1^2 = 135{,}5;\ u_2^2 = 33{,}64;\ u_3^2 = 15{,}0;\ u_4^2 = 8{,}41.$$

Определяем маховой момент:

$$mD_1^2 = 4{,}0J_1 = 4{,}0 \cdot 0{,}025 = 0{,}1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$
$$mD_2^2 = 4{,}0J_2 = 4{,}0 \cdot 0{,}045 = 0{,}18 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$
$$mD_3^2 = 4{,}0J_3 = 4{,}0 \cdot 0{,}11 = 0{,}44 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$
$$mD_4^2 = 4{,}0J_4 = 4{,}0 \cdot 0{,}17 = 0{,}68 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Вычисляем произведения махового момента на квадрат передаточного отношения:

$$mD_1^2 u_1^2 = 0{,}1 \cdot 135{,}5 = 13{,}55 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$
$$mD_2^2 u_2^2 = 0{,}18 \cdot 33{,}64 = 59{,}34 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$
$$mD_3^2 u_3^2 = 0{,}44 \cdot 15{,}0 = 64{,}68 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$
$$mD_4^2 u_4^2 = 0{,}68 \cdot 8{,}41 = 56{,}0 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Данные из каталога и полученные расчетные данные заносим в сводную табл. 11.4.

Таблица 11.4

Тип двигателя	$P_{ном}$, кВт	$n_{ном}$, об/мин	J, кг·м^2	u	u^2	mD^2, кг·м^2	mD^2u^2, кг·м^2
АО2-42-2	7,5	2910	0,025	11,64	135,5	0,1	13,55
АО2-51-4	7,5	1450	0,045	5,8	33,64	0,18	59,34
АО2-52-6	7,5	970	0,11	3,88	15,0	0,44	64,68
АО2-61-8	7,5	725	0,17	2,9	8,41	0,68	56,0

Наиболее выгодное передаточное отношение будет у редуктора с двигателем АО2-61-8, имеющего наименьшее произведение момента на квадрат передаточного отношения.

11.8. Выбрать двигатель для нерегулируемого подъемного механизма, если известно, что вес поднимаемого груза $F = 7500$ Н, максимальная высота подъема $h = 15$ м, скорость подъема $v = 0{,}3$ м/с, время крепления груза $t = 60$ с, КПД подъемного механизма $\eta = 0{,}6$, диаметр барабана лебедки $d = 0{,}4$ м.

Решение. Потребляемая мощность механизма

$$P_{мх} = Fv/\eta = 7500 \cdot 0{,}3/0{,}6 = 3750 \text{ Вт}.$$

Время подъема груза

$$t = h/v = 15/0{,}3 = 50 \text{ с}.$$

Частота вращения барабана лебедки

$$n_б = 60v/(\pi d) = 60 \cdot 0{,}3/(3{,}14 \cdot 0{,}4) = 14{,}33 \text{ об/мин}.$$

Определяем:
передаточные отношения двигателей серии АО2 мощностью $P = 3 \div 4$ кВт

$$u_1 = n_{дв}/n_б = 2880/14{,}33 \approx 200,$$
$$u_2 = n_{дв}/n_б = 1440/14{,}33 \approx 100,$$
$$u_3 = n_{дв}/n_б = 960/14{,}33 \approx 67,$$
$$u_4 = n_{дв}/n_б = 725/14{,}33 \approx 50;$$

квадрат передаточного отношения

$u_1^2 = 40\,000$, $u_2^2 = = 10\,000$, $u_3^2 = 4490$, $u_4^2 = 2500$:

маховой момент (момент инерции берем из каталога)

$$mD_1^2 = 4{,}0J_1 = 4{,}0 \cdot 0{,}01 = 0{,}04 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$
$$mD_2^2 = 4{,}0J_2 = 4{,}0 \cdot 0{,}02 = 0{,}08 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$
$$mD_3^2 = 4{,}0J_3 = 4{,}0 \cdot 0{,}04 = 0{,}16 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$
$$mD_4^2 = 4{,}0J_4 = 4{,}0 \cdot 0{,}072 = 0{,}288 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Определяем произведение махового момента на квадрат передаточного отношения. Полученные данные заносим в табл. 11.5.

Таблица 11.5

$P_{ном}$, кВт	$n_{ном}$, об/мин	mD^2, кг·м²	u	u^2	mD^2u^2, кг·м²
3,0—4,0	2880	0,04	200	40 000	1600
3,0—4,0	1440	0,08	100	10 000	800
3,0—4,0	960	0,16	67	4490	718
3,0—4,0	725	0,288	50	2500	720

Наиболее выгодное передаточное отношение будет у двигателя с частотой вращения $n = 960$ об/мин.
Статический момент сопротивления механизма

$$M_{мх} = 9{,}55P_{мх}/n = 9{,}55 \cdot 3750/960 = 37{,}3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Определяем:
продолжительность включения

$$\text{ПВ}\% = \frac{t_р}{t_р + t_о} 100\% = \frac{50}{50+60} 100\% = 45\%;$$

мощность двигателя для стандартной ПВ% = 40%

$$P_{ст} = P_{мх}\sqrt{\text{ПВ}} = 3750\sqrt{0{,}4} = 2371 \text{ Вт}.$$

Пересчитываем мощность двигателя на действительное значение ПВ% = 45%:

$$P_{дв} = P_{ст}\sqrt{\text{ПВ}_д/\text{ПВ}_{ст}} = 2371\sqrt{0{,}45/0{,}40} \approx 2{,}5 \text{ кВт}.$$

Ближайшим по шкале мощностей является двигатель марки АО2-41-6 мощностью $P_{ном} = 3{,}0$ кВт и с частотой вращения $n_{ном} = 960$ об/мин; КПД $\eta = 81{,}5\%$, коэффициент перегрузки $\lambda = 1{,}8$.
Определяем:
вращающий момент двигателя

$$M = 9{,}55P_{ном}/n_{ном} = 9{,}55 \cdot 3000/960 = 29{,}8 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

максимальный вращающий момент

$$M_{max} = \lambda M_{ном} = 1{,}8 \cdot 29{,}8 = 53{,}64 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Проверяем двигатель на перегрузочную способность:

$$\Delta M = M_{дв} - M_{мх} = 53{,}64 - 37{,}3 = 16{,}34 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Двигатель подходит по перегрузочной способности, так как его момент превышает момент механизма на 16,34 Н·м.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

11.9. Определить вращающий момент и мощность электродвигателя для машины, работающей в продолжительном режиме, если при необходимом усилии $F = 2000$ Н скорость перемещения $v = 0{,}45$ м/с при вращении вала с частотой $n = 700$ об/мин и КПД $\eta = 0{,}7$.

11.10. Определить мощность трехфазного асинхронного двигателя, используемого для подъема груза $F = 15\,000$ Н со скоростью 0,3 м/с и КПД редуктора $\eta = 0{,}5$.

11.11. Для перекачки воды используют насос производительностью 0,05 м³/с, высота напора

$h=4{,}5$ м. Выбрать электродвигатель переменного тока, если необходимая частота вращения $n=1440$ об/мин, а КПД $\eta=0{,}64$.

11.12. Конвейер работает в продолжительном режиме. Выбрать двигатель переменного тока с частотой вращения $n=2880$ об/мин, создающего скорость ленты $v=3{,}5$ м/с при тяговом усилии $F=1000$ Н и КПД $\eta=96\%$.

11.13. Для привода механизма, работающего в продолжительном режиме с переменной нагрузкой, требуется выбрать асинхронный электродвигатель с фазным ротором и номинальной частотой вращения $n=700$ об/мин, работающий по следующему графику:

$$M_1=303{,}8\ \text{Н}\cdot\text{м},\quad t_1=2\ \text{с},$$
$$M_2=107{,}8\ \text{Н}\cdot\text{м},\quad t_2=20\ \text{с},$$
$$M_3=235{,}2\ \text{Н}\cdot\text{м},\quad t_3=10\ \text{с}.$$

11.14. Выбрать тип и мощность двигателя, используемого для привода механизма, работающего по следующему графику:

$$M_1=400\ \text{Н}\cdot\text{м},\quad t_1=10\ \text{с},$$
$$M_2=250\ \text{Н}\cdot\text{м},\quad t_2=30\ \text{с},$$
$$M_3=100\ \text{Н}\cdot\text{м},\quad t_3=50\ \text{с}.$$

По условиям работы механизма частота вращения $n=730$ об/мин должна быть постоянной.

11.15. Определить маховой и вращающий моменты двигателя, если его мощность $P_{\text{ном}}=30$ кВт, частота вращения $n=980$ об/мин, а момент инерции $J=0{,}82$ кг$\cdot$м^2.

11.16. Подъемный механизм работает в продолжительном режиме со следующим графиком нагрузки:

$$P_1=74{,}5\ \text{кВт},\quad t_1=2\ \text{с},$$
$$P_2=37\ \text{кВт},\quad t_2=20\ \text{с},$$
$$P_3=8\ \text{кВт},\quad t_3=8\ \text{с и т. д.}$$

Требуется выбрать крановый электродвигатель постоянного тока последовательного возбуждения с частотой вращения $n=850$ об/мин.

11.17. Определить наивыгоднейшее передаточное отношение для нерегулируемого механизма, потребляющего мощность $P_{\text{мх}}=16{,}5$ кВт и имеющего частоту вращения вала $n_2=10$ об/мин.

11.18. Найти тип и частоту вращения двигателя постоянного тока, используемого для механизма мощностью $P_{\text{мх}}=22$ кВт и частотой вращения вала $n=35$ об/мин. Напряжение сети $U=220$ В.

11.19*. Выбрать двигатель из серии АО2 для редуктора с наивыгоднейшим передаточным отношением. Мощность механизма $P_{\text{мх}}=3{,}5$ кВт, частота вращения вала $n_2=5$ об/мин.

11.20. Пользуясь каталогом электродвигателей переменного тока для повторно-кратковременного режима работы, определить мощность электродвигателя с частотой вращения вала $n_2=730$ об/мин при нагрузке $P=18$ кВт и ПВ$\%=31\%$.

11.21. Пользуясь каталогом двигателей трехфазного тока единой серии АО2, вычислить мощность двигателя с частотой вращения $n=1440$ об/мин в соответствии со следующим графиком:

$$P_1=9\ \text{кВт},\ t_1=16\ \text{с};$$
$$P_2=0,\ t_2=48\ \text{с};$$
$$P_3=9\ \text{кВт},\ t_3=16\ \text{с};$$
$$P_4=0,\ t_4=48\ \text{с}.$$

11.22*. Определить эквивалентный момент, эквивалентную мощность и выбрать двигатель по мощности, если частота вращения $n=1500$ об/мин, общий цикл работы составляет 15 с, а время работы задано следующим графиком:

$$M_1=7{,}5\ \text{Н}\cdot\text{м},\ t_1=2\ \text{с};$$
$$M_2=5{,}6\ \text{Н}\cdot\text{м},\ t_2=3\ \text{с};$$
$$M_3=3{,}6\ \text{Н}\cdot\text{м},\ t_3=6\ \text{с}.$$

11.23*. Определить мощность двигателя для машины, работающей в повторно-кратковременном режиме, в соответствии со следующим графиком:

$$M_1=100\ \text{Н}\cdot\text{м},\ t_1=0{,}5\ \text{с};$$
$$M_2=50\ \text{Н}\cdot\text{м},\ t_2=3{,}0\ \text{с};$$
$$M_3=90\ \text{Н}\cdot\text{м},\ t_3=0{,}5\ \text{с}.$$

Общее время перерыва в работе составляет 4 с, а необходимая частота вращения $n=1440$ об/мин.

11.24*. Выбрать асинхронный двигатель по мощности для электропривода лифта, если заданы следующие условия: вес кабины $F_0=14\,500$ Н,

максимальный груз $F=17\,500$ Н, противовес $F_{пр}=20\,000$ Н, скорость перемещения $v=0{,}25$ м/с при КПД механизма $\eta=0{,}6$ и ПВ% = 35%.

11.25*. Выбрать мощность двигателя для механизма, работающего в повторно-кратковременном режиме, по следующему графику:

$$M_1=588\ \text{Н}\cdot\text{м},\ t_1=4\ \text{с};$$
$$M_2=245\ \text{Н}\cdot\text{м},\ t_2=18\ \text{с};$$
$$M_3=147\ \text{Н}\cdot\text{м},\ t_3=13\ \text{с}.$$

Время цикла равно 120 с, частота вращения приводного вала механизма $n=720$ об/мин.

11.26*. Выбрать электродвигатель для подъемного механизма, работающего в повторно-кратковременном режиме с тяжелыми условиями пуска и с частотой вращения вала $n=725$ об/мин. Механизм работает по следующему графику:

$$M_1=759\ \text{Н}\cdot\text{м},\ t_1=0{,}35\ \text{с};$$
$$M_2=348\ \text{Н}\cdot\text{м},\ t_2=16{,}3\ \text{с};$$
$$M_3=627\ \text{Н}\cdot\text{м},\ t_3=0{,}18\ \text{с};$$
$$M_4=204\ \text{Н}\cdot\text{м},\ t_4=16{,}5\ \text{с}.$$

Общее время цикла равно 120 с.

11.27*. Асинхронный трехфазный двигатель типа МТК-31-6 имеет следующие номинальные технические данные: мощность $P=11{,}0$ кВт, частота вращения $n=920$ об/мин, напряжение $U=380/220$ В; ПВ% = 25%, КПД $\eta=81\%$. Какую мощность сможет дать двигатель при ПВ% = 40; 60%?

11.28*. Пользуясь каталогом электродвигателей для повторно-кратковременного режима работы, определить мощность двигателя постоянного тока для механизма, имеющего следующий график нагрузки:

$$P_1=42\ \text{кВт},\ t_1=5\ \text{с};$$
$$P_2=28\ \text{кВт},\ t_2=25\ \text{с};$$
$$P_3=0,\ t_3=30\ \text{с};$$
$$P_4=30\ \text{кВт},\ t_4=2\ \text{с};$$
$$P_5=15\ \text{кВт},\ t_5=20\ \text{с и т. д.}$$

Частота вращения должна регулироваться в пределах 1200—1800 об/мин.

11.29. Двигатель марки МТК-12-6 имеет следующие номинальные технические данные: мощность

$P=3{,}5$ кВт, частота вращения $n=875$ об/мин, напряжение $U=380/220$ В, номинальный ток $I=16{,}6/9{,}6$ А, ПВ% = 25%, КПД $\eta=70\%$. Какую мощность сможет дать двигатель при ПВ% = 15; 40; 60% и продолжительном режиме работы?

Глава 12

ПЕРЕДАЧА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ И УРАВНЕНИЯ

Потерю напряжения, т. е. разность напряжений в начале и конце линии, определяют по формуле

$$\Delta U=U_1-U_2, \qquad (12.1)$$

где U_1, U_2 — напряжение в начале и конце линии, В.

Частное от деления потери напряжения на напряжение в начале линии, выраженное в процентах, называют относительной потерей напряжения:

$$U_r=\frac{\Delta U}{U_1}\cdot 100\%, \qquad (12.2)$$

или (для трехфазной сети)

$$U_r=\frac{100Pl}{\gamma SU^2}, \qquad (12.3)$$

где U_r — относительная потеря напряжения, %; ΔU — потеря напряжения, В; P — мощность, Вт; l — длина линии, м; S — сечение проводов, мм^2; γ — удельная проводимость: для меди — 57 м/(Ом · мм^2), для алюминия — 34,5 м/(Ом · мм^2).

Преобразовав выражение (12.3), получим уравнение для определения сечения проводов по допустимой потере напряжения:

$$S=\frac{100Pl}{\gamma U^2U_r}. \qquad (12.4)$$

Соответственно для двухпроводной линии

$$S=\frac{2\cdot 100Pl}{\gamma U^2U_r}. \qquad (12.5)$$

Определение сечения проводов и кабелей по допустимому нагреву определяют по таблицам допустимых длительных токовых нагрузок.

Приближенно сечение проводов и кабелей можно рассчитать по заданной плотности тока:

$$S_i = I/J, \qquad (12.6)$$

где I — ток, проходящий по магистральному проводу, А; J — плотность тока, А/мм^2.

Расчетная активная мощность

$$P = \sum K_c P_y, \qquad (12.7)$$

где K_c — коэффициент спроса группы приемников; P_y — установленная мощность электроприемников, кВт.

Приближенный коэффициент спроса некоторых электроприемников можно определить по следующим данным:

1) для двигателей, работающих в продолжительном режиме,— 0,8;

2) для двигателей подъемных механизмов, работающих в повторно-кратковременном режиме: от 1 до 5 двигателей — 0,4; от 5 до 10 двигателей — 0,25;

3) для двигателей металлообрабатывающих станков, работающих в повторно-кратковременном режиме: от 1 до 5 двигателей — 0,8; от 5 до 10 двигателей — 0,65;

4) для двигателей деревоотделочных мастерских: от 1 до 5 двигателей — 0,7; от 5 до 10 двигателей — 0,5.

Мощности:

расчетная реактивная

$$Q = \sum P \operatorname{tg}\varphi, \qquad (12.8)$$

где Q — расчетная реактивная мощность группы электроприемников, вар; $\operatorname{tg}\varphi$ — угол сдвига фаз, соответствующий данному коэффициенту мощности;

полная

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \qquad (12.9)$$

где S — полная мощность, В·А; P — расчетная активная мощность, Вт.

Потребляемый энергоприемником ток

$$I = \frac{P_{ном}}{1{,}73 U \cos\varphi\,\eta} = \frac{S_{ном}}{1{,}73 U \eta}, \qquad (12.10)$$

где $P_{ном}$ — номинальная мощность, Вт; $S_{ном}$ — полная номинальная мощность, В·А; U — линейное напряжение, В; $\cos\varphi$ — коэффициент мощности; η — КПД.

Реактивная составляющая тока

$$I_p = I_a \sin\varphi. \qquad (12.11)$$

Полный ток

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}. \qquad (12.12)$$

Выбор номинального тока плавкой вставки для одного двигателя осуществляют:

а) по номинальному току двигателя

$$I_{ном\,в} \geqslant \alpha I_{ном}; \qquad (12.13)$$

б) по пусковому току

$$I_{ном\,в} \geqslant \frac{I_п}{\beta} = \frac{K_i I_{ном}}{\beta}, \qquad (12.14)$$

где $I_{ном}$, $I_п$ — номинальный и пусковой токи двигателей, А; α — коэффициент, зависящий от режима работы двигателя ($\alpha = 1$ при продолжительном и $\alpha = 1{,}25$ при повторно-кратковременном режимах работы); β — коэффициент, характеризующий условия пуска (при нормальных условиях пуска $\beta = 2{,}5$, при тяжелых условиях пуска $\beta = 1{,}6 \div 2$); K_i — кратность пускового тока.

Выбор плавкой вставки для группы двигателей

$$I_в \geqslant \frac{\sum I_{ном\,дв} + (I'_п - I'_{ном})}{2{,}5}, \qquad (12.15)$$

где $\sum I_{ном\,дв}$ — сумма номинального тока одновременно работающих двигателей; $(I'_п - I'_{ном})$ — разность между пусковым и номинальным токами двигателя.

Ток уставки максимального расцепителя автомата

$$I_{уст\,эм} \geqslant K_н I_п, \qquad (12.16)$$

где $K_н$ — коэффициент надежности (запаса).

Для двигателей постоянного тока и фазных двигателей, пускаемых с помощью реостатов, $K_н = 1{,}3$. Для асинхронных трехфазных двигателей с короткозамкнутым ротором $K_н = 1{,}8$.

Номинальный ток теплового расцепителя (реле) выбирают из условия

$$I_{ном\,расц} \geqslant \alpha I_{ном\,дв}, \qquad (12.17)$$

где α — коэффициент, зависящий от пуска двигателя.

При номинальных условиях пуска $\alpha=1$, при тяжелых — $\alpha=1{,}5$.

Сечение провода, термически устойчивое к токам короткого замыкания,

$$S_{\min}=I_{\text{к}}\sqrt{t/K}, \qquad (12.18)$$

где t — время срабатывания защиты (расцепителя); K — коэффициент, равный для меди 140, для алюминия — 95.

Если при расчете по выражению (12.18) сечение провода получилось больше, чем при определении сечения по потере напряжения или допустимым токам, то выбирают расцепитель с меньшим временем срабатывания или сечение провода по наибольшему расчетному значению.

ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ С РЕШЕНИЯМИ

12.1. Механический цех, отстоящий от заводской трансформаторной подстанции на 150 м, обеспечивается энергией переменного тока напряжением 400/230 В. Цех имеет три группы электродвигателей. *Первая* группа, состоящая из 10 двигателей мощностью по 7,5 кВт с $\cos\varphi_2=0{,}89$, КПД $\eta_1=0{,}87$, удалена от ввода на 10 м; *вторая* — из 6 двигателей мощностью по 4 кВт с $\cos\varphi_2=0{,}8$ и КПД $\eta=0{,}83$, удалена от ввода на 25 м; *третья* — из 12 двигателей мощностью по 5,5 кВт с $\cos\varphi_2=0{,}72$ и КПД $\eta=0{,}85$, удалена от ввода на 35 м. Допустимая потеря напряжения в линии 4% от $U_{\text{ном}}$, плотность тока $J=2{,}5$ А/мм^2. Произвести расчет распределительной сети.

Решение. Определяем допустимую потерю напряжения в линии от трансформаторной подстанции до нагрузки:

$$\Delta U=\frac{\Delta U\%\,U_1}{100}=\frac{4\cdot 230}{100}=9{,}2\text{ В}.$$

Напряжение на зажимах наиболее удаленной группы электродвигателей $U_2=U_1-\Delta U=230-9{,}2=220{,}8$ В.

Определяем активную мощность отдельных групп двигателей с учетом коэффициента спроса:

$$P_1=\sum K_{\text{с}}P_{1\text{г}}=n_1K_{\text{с}}P_{21}=10\cdot 0{,}65\cdot 7500=48\,750\text{ Вт},$$
$$P_2=\sum K_{\text{с}}P_{2\text{г}}=n_2K_{\text{с}}P_{22}=6\cdot 0{,}65\cdot 4000=15\,600\text{ Вт},$$
$$P_3=\sum K_{\text{с}}P_{3\text{г}}=n_3K_{\text{с}}P_{23}=12\cdot 0{,}6\cdot 5500=39\,000\text{ Вт}.$$

Находим активные составляющие токов при номинальном напряжении:

$$I_{1\text{а}}=\frac{n_1P_2}{\sqrt{3}\,U_{\text{ном}}\cos\varphi\eta}=\frac{48\,750}{1{,}73\cdot 220-0{,}89\cdot 0{,}87}=165\text{ А},$$
$$I_{2\text{а}}=\frac{n_2P_2}{\sqrt{3}\,U_{\text{ном}}\cos\varphi\eta}=\frac{15\,600}{1{,}73\cdot 220\cdot 0{,}8\cdot 0{,}83}=61{,}7\text{ А},$$
$$I_{3\text{а}}=\frac{n_3P_3}{\sqrt{3}\,U_{\text{ном}}\cos\varphi\eta}=\frac{39\,600}{1{,}73\cdot 220\cdot 0{,}72\cdot 0{,}85}=170\text{ А}.$$

Определяем реактивные составляющие токов:

$$I_{1p}=I_{1\text{а}}\sin\varphi=165\cdot 0{,}45=74\text{ А},$$
$$I_{2p}=I_{2\text{а}}\sin\varphi=61{,}7\cdot 0{,}6=37\text{ А},$$
$$I_{3p}=I_{3\text{а}}\sin\varphi=170\cdot 0{,}7=119\text{ В}.$$

Общий ток на участке от ТП до ввода в цех

$$I=\sqrt{I_{\text{а}}^2+I_p^2}=\sqrt{(165+61{,}7+170)^2+(74+37+119)^2}=458\text{ А}.$$

Находим сечения проводов линии по заданной потере напряжения:

$$S_U=\frac{\sqrt{3}\,Il}{\gamma\Delta U}=\frac{1{,}73\cdot 458\cdot 150}{57\cdot 9{,}2}=220\text{ мм}^2.$$

Выбираем провод сечением 240 мм^2. Проверяем сечение проводов линии по допустимому нагреву:

$$S_I=I/J=458/2{,}5=183\text{ мм}^2.$$

Сравнивая полученный результат с сечением проводов линии по допустимой потере напряжения, устанавливаем, что расчетное сечение линии превышает в 1,3 раза сечение линии по нагреву.

Определяем ток срабатывания автомата, защищающего линию от коротких замыканий и от продолжительной перегрузки.

Токи расцепителя:

мгновенного

$$I_{\text{уст}}\geqslant K_{\text{в}}I=1{,}7\cdot 458=778\text{ А};$$

теплового

$$I_{\text{ном расц}} \geqslant \alpha I = 1 \cdot 458 \text{ А} = 458 \text{ А}.$$

Для защиты линии выбираем автомат комбинированного действия типа АВМ10С с временем срабатывания 0,06 с и током $I = 800$ А.

Определяем сопротивление линии «фаза — нуль»:

$$R = \rho 2l/S = 0{,}017 \cdot 2 \cdot 150/240 = 0{,}021 \text{ Ом}.$$

Ток короткого замыкания линии

$$I_{\text{к}} = U/R = 230/0{,}021 = 10\,952 \text{ А}.$$

Сравнивая значение полученного тока с уставкой максимального тока (800 А), делаем вывод, что ток короткого замыкания превышает уставку в 13 раз, поэтому предохранительное устройство сработает надежно.

Рассчитываем линию на термическую устойчивость к токам короткого замыкания:

$$S_{\min} = I_{\text{к}} \sqrt{t/K} = 10\,952 \sqrt{0{,}06/140} = 226 \text{ мм}^2,$$

где t — время срабатывания расцепителя; K — коэффициент, равный для меди 140, для алюминия — 95.

Произведем расчет линии от места ввода ее в цех до третьей группы электродвигателей.

Активная мощность третьей группы двигателей при коэффициенте спроса $K_{\text{с}} = 0{,}6$

$$P_1 = \sum K_{\text{с}} P_{1\text{г}} = n_1 K_{\text{с}} P_{21} = 10 \cdot 0{,}65 \cdot 7500 = 48\,750 \text{ Вт}.$$

Реактивная мощность

$$Q = P_1 \operatorname{tg} \varphi = 48\,750 \cdot 0{,}5 = 24\,375 \text{ вар}.$$

Полная мощность группы двигателей

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{48\,750^2 + 24\,375^2} = 54\,500 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Ток в проводах, подводящих энергию к двигателям,

$$I_{1\text{г}} = \frac{S}{\sqrt{3}\, U_{\text{ном}} \eta} = \frac{53\,480}{1{,}73 \cdot 220 \cdot 0{,}87} = 164 \text{ А}.$$

Определяем сечение проводов по допустимому нагреву:

$$S = I_{1\text{г}}/J = 164/2{,}5 = 65{,}8 \text{ мм}^2.$$

Выбираем провод сечением 70 мм^2. Для защиты линии от ввода до группы двигателей выбираем

автоматический выключатель типа А3130 с комбинированным расцепителем на ток 200 А.

Определяем номинальный ток одного двигателя:

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_2}{\sqrt{3}\, U_{\text{ном}} \cos \varphi \eta} = \frac{7500}{1{,}73 \cdot 220 \cdot 0{,}89 \cdot 0{,}87} = 25 \text{ А}.$$

Пусковой ток двигателя

$$I_{\text{п}} = K_I I_{\text{ном}} = 6 \cdot 25 = 150 \text{ А},$$

где K_I — кратность пускового тока.

Выбор плавкого предохранителя для защиты двигателя от короткого замыкания производят с учетом номинального тока двигателя, работающего в определенном режиме, и пускового тока двигателя.

Определяем ток двигателя при повторно-кратковременном режиме:

$$I_{\text{ном в}} \geqslant \alpha I_{\text{ном}} = 1{,}25 \cdot 25 = 31{,}25 \text{ А}.$$

Пусковой ток двигателя при нормальных условиях пуска

$$I_{\text{ном в}} \geqslant I_{\text{п}}/\beta = 150/2{,}5 = 60 \text{ А}.$$

На основании полученных данных выбираем предохранитель типа НПР-100 на номинальный ток плавкой вставки $I = 60$ А. Если для защиты использовать автомат с максимальным электромагнитным расцепителем, то уставку выбирают по формуле на ток

$$I_{\text{уст эм}} \geqslant 1{,}8 I_{\text{п}} = 1{,}8 \cdot 150 = 270 \text{ А}.$$

Коэффициент 1,8 вводят для исключения ложных срабатываний.

Для пуска, остановки и реверсирования двигателей выбираем магнитные пускатели типа ПМЕ-214 с номинальным током теплового реле $I = 25$ А и номинальным напряжением $U = 220$ В.

Расчет для первой и второй групп электродвигателей производят аналогично тому, как это делалось для третьей группы.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

12.2. Четыре установки с лампами накаливания имеют мощности $P_1 = 4$ кВт, $P_2 = 8$ кВт, $P_3 = 12$ кВт и $P_4 = 1$ кВт, расстояния от трансформаторной подстанции, имеющей низшее напряжение $U_2 = 400/230$ В,

соответственно $l_1 = 60$ м, $l_2 = 100$ м, $l_3 = 110$ м и $l_4 = 130$ м. Определить сечение кабеля для четырехпроводной сети трехфазного тока при допустимой потере напряжения $U_2 = 3\%$.

12.3. В механическом цехе установлены 30 станков с суммарной мощностью двигателей $P = 120$ кВт и 15 насосов и вентиляторов с общей номинальной мощностью $P_2 = 12$ кВт. Напряжение сети 380 В. Определить расчетную мощность, потери мощности, расчетный ток и сечение линии, если заданная плотность тока $J = 6$ А/мм^2.

12.4*. Определить сечение проводов однофазной линии, по которой передается мощность $P_2 = 75$ кВт на расстояние 1500 м при фазном напряжении у потребителя $U = 380$ В, если коэффициент мощности потребителя $\cos\varphi = 0{,}8$, допускаемая потеря мощности в линии 6% от передаваемой мощности. Какую экономию меди можно получить, если для передачи той же мощности вместо однофазной линии применить трехфазную при неизменных потерях мощности и напряжения?

12.5*. Определить сечение медных проводов трехжильного кабеля для трехфазной линии без учета и с учетом пускового тока, питающей три трехфазных электродвигателя мощностью 17, 22 и 40 кВт; КПД электродвигателей $\eta_1 = 0{,}89$, $\eta_2 = 0{,}9$ и $\eta_3 = 0{,}91$, $\cos\varphi = 0{,}9$; расстояния от электродвигателей до питающего пункта $l_1 = 50$ м, $l_2 = 80$ м и $l_3 = 120$ м; напряжение питающего пункта $U_1 = 230$ В; допустимая потеря напряжения в проводах составляет 4%, а кратность пускового тока $K_i = 3$.

12.6*. Потребитель с номинальной мощностью $P_{ном} = 12$ кВт и номинальным напряжением $U_{ном} = 380$ В получает питание от подстанции, находящейся на расстоянии 500 м. Потеря напряжения в линии не должна превышать 5%. Определить необходимое сечение медных проводов, напряжение в начале линии, мощность потерь в процентах к мощности потребителя, если напряжение на его зажиме равно номинальному. Произвести проверку полученного сечения проводов на нагрев для условий длительной работы при плотности тока $J = 6$ А/мм^2. Выбрать защитную аппаратуру.

12.7. Четыре энергоприемника имеют следующие токи и коэффициенты мощности: $I_1 = 20$ А, $\cos\varphi = 0{,}8$;

$I_2 = 40$ А, $\cos\varphi = 0{,}9$; $I_3 = 5$ А, $\cos\varphi = 0{,}86$ и $I_4 = 10$ А, $\cos\varphi = 0{,}6$. Расстояния от трансформатора, имеющего напряжение $U_ф = 127$ В, $l_1 = 40$ м, $l_2 = 45$ м, $l_3 = 50$ м, $l_4 = 60$ м. Допускаемая потеря напряжения $U_2 = 4{,}7\%$. Определить стандартное сечение проводов линии, номинальные токи плавких вставок в начале каждого участка и всей линии, время срабатывания уставки для защиты линии на термическую устойчивость. Нагрузкой являются асинхронные двигатели с разностью $I'_п - I'_{ном} = 30$.

12.8*. Театральный регулятор освещения имеет шесть стоек по десять регуляторов напряжения, имеющих следующие технические данные: мощность $P = 5$ кВт, $\cos\varphi = 0{,}9$, КПД $\eta = 0{,}92$, напряжение питания $U_1 = 260$ В, длина линии питания $l = 100$ м, допустимая потеря напряжения $U_2 = 5\%$, плотность тока $J = 2{,}5$ А/мм^2. Определить расчетный ток, сечение проводов, потери напряжения и мощности, КПД линии, уставку максимального тока, сечение проводов на термическую устойчивость.

12.9*. От трансформаторного пункта с напряжением на выходе $U = 400/230$ В проложена электрическая сеть к трем распределительным щитам. Характеристика электропотребителей приведена в табл. 12.1.

Таблица 12.1

Характеристика потребителей	Распределительный щит		
	№ 1	№ 2	№ 3
Расстояние от ТП до распределительного щитка, м	120	140	160
Количество двигателей n, шт.	8	2	10
Мощность двигателя P, кВт	7,5	10	5,5
КПД η, %	87	88,5	88,5
$\cos\varphi$	0,86	0,87	0,87
Кратность пускового тока K_i	7	5	5
Расстояние от щитка для двигателей, м	10	12	8

Произвести расчет линии при заданной потере напряжения $U_r = 4\%$ и плотности тока $J = 7$ А/мм^2.

12.10*. Электромеханическая мастерская питается от трансформаторного пункта напряжением $U = 380/220$ В. Характеристика подключенных двигателей и электроосвещения указана в табл. 12.2

Таблица 12.2

Характеристика двигателей	Группы			Освещение
	1	2	3	
Номинальная мощность P, кВт	4,0	13	10	4
КПД η, %	85,5	88,0	88,5	—
Коэффициент мощности	0,89	0,89	0,89	—
Кратность пускового тока K_I	5	5,5	5,5	—
Количество двигателей n, шт	2	3	1	—
Расстояние от ввода ТП, м	50	55	60	55

Рассчитать электрическую сеть, выбрать защитную и пусковую аппаратуру, напряжение в начале линии, если допустимая потеря напряжения $U_r = 5\%$, а плотность тока $J = 7$ А/мм^2.

Раздел второй

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

Глава 13

ЭЛЕКТРОННЫЕ ЛАМПЫ

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ И УРАВНЕНИЯ

Параметры диода. Плотность тока эмиссии катода

$$J = AT^2 e^{-w_0/(kT)}, \qquad (13.1)$$

где A — эмиссионная постоянная, А/(см$^2 \cdot$ К^2); T — абсолютная температура катода, К; $e = 2{,}178$ — основание натуральных логарифмов; w_0 — работа выхода электрона из металла, Дж; $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана.

Эффективность катода

$$H = I_e / P_н, \qquad (13.2)$$

где I_e — ток эмиссии, А; $P_н$ — мощность, затраченная на нагревание катода, Вт.

Внутреннее сопротивление диода переменному току (рис. 13.1)

$$R_i = \Delta U_a / \Delta I_a. \qquad (13.3)$$

Крутизна характеристики диода (рис. 13.1)

$$S = \Delta I_a / \Delta U_a. \qquad (13.4)$$

Внутреннее сопротивление диода постоянному току (рис. 13.1)

$$R_0 = U_a / I_a. \qquad (13.5)$$

Мощность, рассеиваемая анодом,

$$P_a = I_a U_a. \qquad (13.6)$$

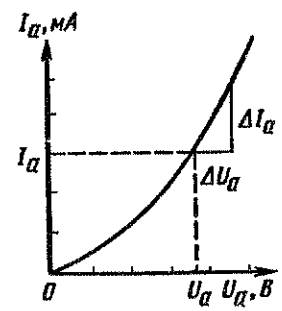

Рис. 13.1

Параметры триода. Внутреннее уравнение триода (рис. 13.2, *а*, *б*)

$$SR_i = \mu \qquad (13.7)$$

или

$$SR_i D = 1, \qquad (13.8)$$

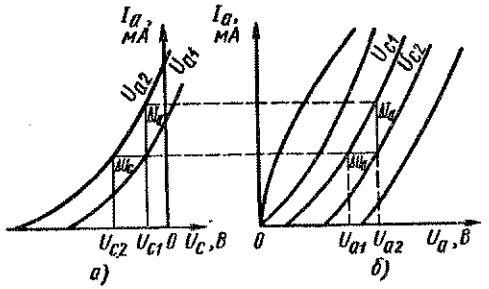

Рис. 13.2

где $S=\Delta I_a/\Delta U_c=\Delta I_a/(U_{c1}-U_{c2})$ — крутизна статической характеристики: $R_i=\Delta U_a/\Delta I_a=(U_{a1}-U_{a2})/\Delta I_a$ — внутреннее сопротивление триода переменному току; $\mu=(U_{a1}-U_{a2})/\Delta U_c=\Delta U_a/(U_{c1}-U_{c2})$ — статический коэффициент усиления триода; $D=1/\mu$ — проницаемость триода.

ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ С РЕШЕНИЯМИ

13.1. В диоде, характеристика которого описывается законом степени 3/2, анодный ток $I_a=3$ мА при анодном напряжении $U_a=80$ В. Определить анодное напряжение, при котором мощность, рассеиваемая анодом, $P_a=2$ Вт.

Решение. По условию, $I_a=kU_a^{3/2}$, откуда

$$k=I_a/U_a^{3/2}=3\cdot10^{-3}/80^{3/2}=4{,}2\cdot10^{-6}.$$

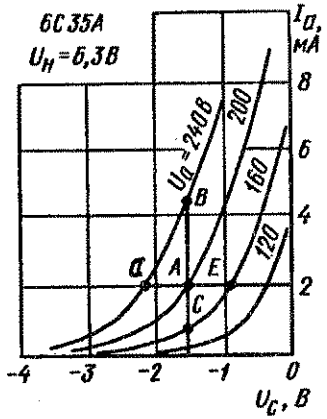

Рис. 13.3

Мощность, рассеиваемая анодом,

$$P_a=I_aU_a=kU_a^{3/2}U_a=kU_a^{5/2}.$$

Напряжение анода

$$U_a=(P_a/k)^{2/5}=(2/4{,}2\cdot10^{-6})^{2/5}=187\text{ В}.$$

13.2. По семейству анодно-сеточных характеристик триода 6С35А (рис. 13.3) определить параметры S, R_i, μ в рабочей точке A, в которой напряжения на сетке $U_c=-1{,}5$ В, на аноде $U_a=200$ В.

Решение. Через рабочую точку A проводим вертикальную и горизонтальную прямые линии до пересечения с ближайшими характеристиками.

По характеристикам определяем:

$$\Delta I_a=BC=3{,}4\text{ мА}$$

— изменение тока при постоянном напряжении на сетке $U_c=-1{,}5$ В;

$$\Delta U_c=DE=1{,}4\text{ В}$$

— изменение напряжения на сетке при неизменном токе $I_a=2$ мА;

$$\Delta U_c=240-160=80\text{ В}$$

— изменение напряжения на аноде, при котором анодный ток изменяется на ΔI_a, а сеточное напряжение — на ΔU_c.

Находим параметры триода в рабочей точке:

крутизна характеристики

$$S=\Delta I_к/\Delta U_c=3{,}4\cdot10^{-3}/1{,}4=2{,}4\text{ мСм};$$

внутреннее сопротивление

$$R_i=\Delta U_a/\Delta I_a=80/(3{,}4\cdot10^{-3})=23{,}5\text{ кОм};$$

коэффициент усиления

$$\mu=\Delta U_a/\Delta U_c=80/1{,}4=57.$$

13.3. Определить напряжение на сетке триода 6Н28Б-В, если известны сопротивление постоянному току $R_0=20$ кОм и мощность, выделяемая на аноде, $P_a=0{,}5$ Вт. Использовать семейство статических анодных характеристик этого триода (рис. 13.4).

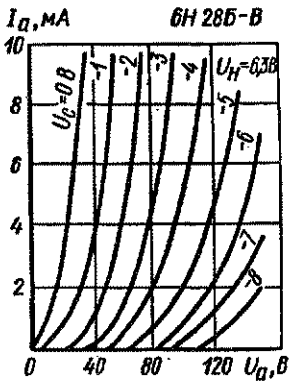

Рис. 13.4

Решение. Определяем напряжение и ток в рабочей точке:

$$P_a=I_aU_a=U_a^2/R_0);\ U_a=\sqrt{P_a/R_0}=\sqrt{0{,}5\cdot20\cdot10^3}=100\text{ В};\ I_a=P_a/U_a=0{,}5/100=5\text{ мА}.$$

По семейству анодных характеристик находим, что ток

$I_a = 5$ мА проходит в триоде при напряжениях на аноде $U_a = 100$ В и на сетке $U_c = -4$ В.

13.4. Как изменится анодный ток триода при увеличении (по модулю) сеточного напряжения на $\Delta U_c = 2$ В и уменьшении анодного напряжения на $\Delta U_a = 20$ В, если в пределах указанных изменений напряжений параметры триода постоянны: $S = 5$ мСм и $\mu = 25$?

Решение. При увеличении (по модулю) сеточного напряжения при неизменном анодном напряжении анодный ток уменьшается на $\Delta I'_a = S\Delta U_c$.

Вместе с тем уменьшение анодного напряжения приводит к смещению анодно-сеточной характеристики вправо и вниз, что ведет к дополнительному уменьшению тока на $\Delta I''_a = S(D\Delta U_a)$. Очевидно, что результирующее изменение тока определяется управляющим напряжением $\Delta U_y = \Delta U_c + D\Delta U_a$ и тогда $\Delta I_a = S\Delta U_y = S(\Delta U_c + D\Delta U_a) = 5(2 + 0{,}04 \cdot 20) = 6$ мА, где $D = 1/\mu = 0{,}04$.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

13.5. Найти плотность эмиссии при температуре катода $t = 1200$ К, если работа выхода электронов из металла $w_0 = 3 \cdot 10^{-19}$ Дж, а эмиссионная постоянная $A = 35$ А/(см$^2 \cdot$К^2).

13.6. Определить температуру катода, имеющего плотность эмиссии $J = 546$ мА/см^2, если работа выхода электронов из металла $w_0 = 4 \cdot 10^{-19}$ Дж, а эмиссионная постоянная $A = 60$ А/(см$^2 \cdot$К^2).

13.7. Определить работу выхода электронов из металла катода, имеющего температуру $t = 1000$ К, если эмиссионная постоянная $A = 40$ А/(см$^2 \cdot$К^2), а плотность эмиссии $J = 536$ мА/см^2.

13.8. Определить эффективность катода, имеющего ток эмиссии $I_e = 15$ мА, если при напряжении накала $U_н = 6{,}3$ В ток накала $I_н = 150$ мА.

13.9. Найти ток эмиссии катода, у которого при напряжении накала $U_н = 6{,}3$ В ток накала $I_н = 450$ мА, а эффективность катода $H = 42$ мА/Вт.

13.10. Анодная характеристика диода описывается уравнением $I_a = 0{,}5 \cdot 10^{-3}\, U_a^{3/2}$. Определить анодный ток, при котором на аноде выделяется мощность $P_a = 5$ Вт.

13.11. Анодная характеристика диода описывается уравнением $I_a = 10\, U_a^{3/2}$. Определить мощность, выделяющуюся на аноде, при анодном напряжении $U_a = 25$ В.

13.12. В диоде, характеристика которого описывается законом степени 3/2, анодный ток $I_a = 5$ мА при анодном напряжении $U_a = 20$ В. Определить ток диода, при котором мощность, выделяемая на аноде, $P_a = 1$ Вт.

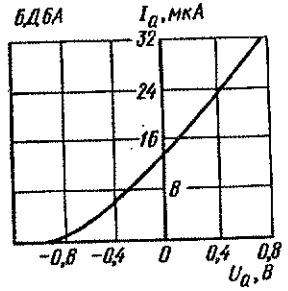

Рис. 13.5

13.13. В диоде, характеристика которого описывается законом степени 3/2, анодный ток $I_a = 10$ мА при анодном напряжении $U_a = 120$ В. Определить анодный ток при анодном напряжении $U_a = 50$ В.

13.14. По анодной характеристике диода 6Д6А (рис. 13.5) определить крутизну характеристики S и внутреннее сопротивление переменному току R_i при анодных напряжениях $U_a = -0{,}2$; $-0{,}4$, $-0{,}6$; $-0{,}8$ В. Построить зависимости крутизны характеристики и внутреннего сопротивления от анодного напряжения.

13.15. Используя анодную характеристику диода 6Д6А (рис. 13.5), определить крутизну и внутреннее сопротивление переменному току при анодных токах $I_a = 2$; 4; 8; 12; 18 мкА.

13.16. Используя анодную характеристику диода 6Д6А (рис. 13.5), определить сопротивление постоянному току R_0 для напряжений на аноде $U_a = -0{,}2$; $-0{,}4$; $-0{,}6$; $-0{,}8$ В.

13.17. Резистор включен в цепь диода 6Х2П (рис. 13.6). Определить ток анода I_a при $E_a = 15$ В

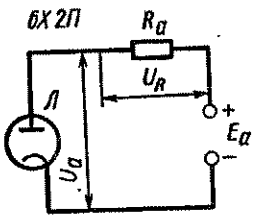

Рис. 13.6

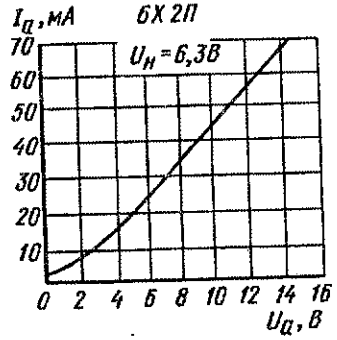

Рис.13.7

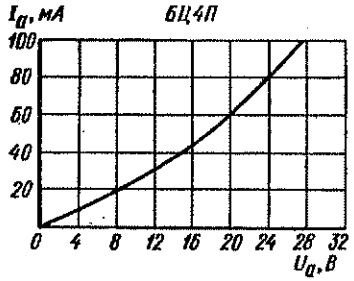

Рис. 13.8

и $R_a = 510$ Ом. Анодная характеристика диода 6Х2П приведена на рис. 13.7.

13.18. Для схемы рис. 13.6 определить сопротивление резистора R_a, необходимое для того, чтобы обеспечить напряжение $U_a = 0{,}5\,E_a$; $U_a = 2U_r$; $U_a = 0{,}5\,U_r$, если напряжение источника анодного питания $E_a = 15$ В.

13.19. Определить мощность, рассеиваемую на аноде диода в схеме рис. 13.6, при условии, что напряжение источника анодного питания $E_a = 15$ В, сопротивление нагрузки $R_a = 300$ Ом.

13.20. Определить напряжение и ток в диоде для схемы рис. 13.6 при условии, что напряжение источника анодного питания $E_a = 10$ В, напряжение на нагрузке $U_r = 5$ В.

13.21. По анодной характеристике кенотрона 6Ц4П (рис. 13.8) определить анодные токи I_a для анодных напряжений $U_a = 8$, 16, 32 В.

13.22. По анодной характеристике кенотрона 6Ц4П (рис. 13.8) определить анодные напряжения U_a для анодных токов $I_a = 10$; 30; 50; 70 мА.

13.23. При изменении анодного напряжения диода на $\Delta U_a = 10$ В среднее значение крутизны характеристики $S = 6$ мСм. Определить изменение анодного тока ΔI_a.

13.24. При изменении анодного тока диода на $\Delta I_a = 40$ мА среднее значение крутизны характеристики диода $S = 8$ мСм. Определить изменение анодного напряжения диода.

13.25. Определить изменение анодного тока ΔI_a, если при изменении анодного напряжения $\Delta U_a = 10$ В среднее значение внутреннего сопротивления переменному току $R_i = 2$ кОм.

13.26. Определить изменение анодного напряжения диода ΔU_a, если при изменении анодного тока $\Delta I_a = 8$ мА среднее значение крутизны характеристики $S = 2$ мСм.

13.27. Определить мощность потерь на аноде P_a для диода 6Х2П в случае напряжения на аноде

$U_a = 10$ В. Анодная характеристика диода приведена на рис. 13.7.

13.28. Используя анодную характеристику диода 6Х2П (см. рис. 13.7), найти мощность потерь на аноде P_a при анодном токе $I_a = 20$ мА.

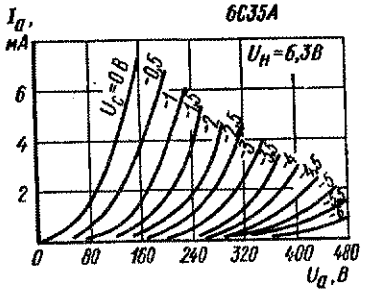

Рис. 13.9

13.29. Мощность, выделяемая на аноде кенотрона, $P_a = 5$ Вт, внутреннее сопротивление кенотрона постоянному току $R_0 = 2$ кОм. Определить в кенотроне ток I_a и напряжение U_a.

13.30. Мощности, выделяемые на анодах двух кенотронов, одинаковы ($P_{a1} = P_{a2}$) при отношении анодных напряжений $U_{a2}/U_{a1} = 2$. Определить отношение внутренних сопротивлений постоянному току кенотронов

13.31. Сравнить мощности, выделяемые на анодах двух диодов, при напряжениях на анодах диодов $U_{a1} = 50$ В, $U_{a2} = 75$ В, внутреннем сопротивлении постоянному току одного диода $R_{01} = 2{,}5$ кОм, анодном токе другого диода $I_{a2} = 150$ мА.

13.32. Используя семейство статических анодных характеристик триода 6С35А (рис. 13.9), построить анодно-сеточную характеристику для напряжения на аноде $U_a = 180$ В.

13.33. По семейству статических анодно-сеточных характеристик триода 6С35А (см. рис. 13.3) построить анодную характеристику для напряжения на сетке $U_c = -1{,}75$ В.

13.34. По семейству статических анодно-сеточных характеристик 6С35А (см. рис. 13.3) определить изменение анодного тока ΔI_a при постоянном напряжении на сетке $U_a = -1$ В и изменении анодного напряжения U_a от 120 до 240 В.

13.35. По семейству статических анодных характеристик триода 6С35А (рис. 13.9) определить изменение анодного тока ΔI_a при постоянном напряжении на аноде $U_a = 220$ В и изменении напряжения на сетке U_c от $-0{,}5$ до -2 В.

13.36. Как изменится напряжение на аноде триода 6С35А при изменении напряжения на сетке U_c от

$-0{,}5$ до $-3{,}5$ В при постоянном анодном токе $I_a = 2$ мА? Анодные характеристики триода 6С35А приведены на рис. 13.9.

13.37. Как нужно изменить напряжение на сетке для изменения анодного тока I_a триода 6С35А от 1 до 4 мА при постоянном напряжении на аноде $U_a = 140$ В? Семейство статических анодных характеристик триода 6С35А приведено на рис. 13.9.

13.38. В каких пределах изменится напряжение на сетке триода 6С35А, если при постоянном анодном токе $I_a = 2$ мА изменять напряжение на аноде U_a от 120 до 240 В? Семейство статических анодно-сеточных характеристик триода 6С35А приведено на рис. 13.3.

13.39. По семейству статических анодных характеристик триода 6С45П-Е (рис. 13.10) определить, как нужно изменить напряжение на сетке, чтобы при постоянном анодном напряжении $U_a = 150$ В первоначальный анодный ток $I_a = 12$ мА увеличился в четыре раза.

13.40. По семейству статических анодно-сеточных характеристик триода 6С45П-Е (рис. 13.11) определить положение рабочей точки, в которой напряжение на сетке $U_c = -1{,}5$ В, напряжение на аноде $U_a = 150$ В.

13.41. По семейству статических анодно-сеточных характеристик триода 6С45П-Е (рис. 13.11) определить положение рабочей точки, в которой анодный ток $I_a = 25$ мА, напряжение на сетке $U_c = -2{,}5$ В.

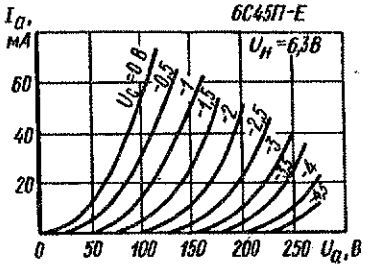

Рис. 13.10

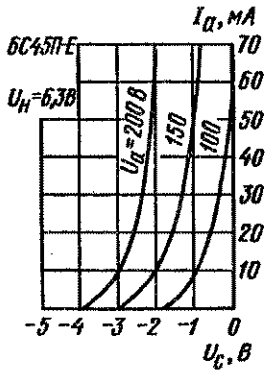

Рис. 13.11

13.42. По семейству статических анодно-сеточных характеристик триода 6С45П-Е (рис. 13.11) определить положение рабочей точки, в которой анодный ток $I_a = 40$ мА, напряжение на аноде $U_a = 200$ В.

13.43. Пользуясь семейством статических анодных характеристик триода 6С35А (см. рис. 13.9), определить параметры триода S, R_i, μ для рабочей точки A, в которой напряжение на сетке $U_c = -2$ В, напряжение на аноде $U_a = 240$ В.

13.44. Используя семейство статических анодно-сеточных характеристик триода 6С35П-Е (рис. 13.11), определить напряжения запирания E_{c0} для напряжений на аноде $U_a = 100$; 150; 200 В.

13.45. Внутреннее сопротивление триода переменному току $R_i = 5$ кОм, проницаемость триода $D = 0{,}05$. Определить крутизну характеристики S.

13.46. Для изменения анодного тока триода на $\Delta I_a = 6$ мА необходимо изменить напряжение на сетке на $\Delta U_c = 1{,}5$ В или напряжение на аноде на $\Delta U_a = 120$ В. Определить крутизну характеристики триода S, внутреннее сопротивление переменному току R_i, коэффициент усиления μ.

13.47. Объяснить, как влияет расстояние сетка — катод на крутизну анодно-сеточной характеристики триода.

13.48. Два триода одинаковой конструкции имеют равные расстояния сетка — анод, но разные расстояния сетка — катод. Чем отличаются характеристики триодов?

13.49. Используя семейство статических анодных характеристик триода 6Н17Б (рис. 13.12), определить коэффициент усиления триода μ при напряжении на сетке $U_c = -2$ В и напряжениях на аноде $U_a = 120$; 140; 160 В.

13.50. По семейству статических анодно-сеточных характеристик триода 6Н17Б (рис. 13.12) определить крутизну при напряжении на аноде $U_a = 200$ В и напряжениях на сетке $U_c = -1$; $-1{,}5$; -2 В.

13.51. Для триода 6Н17Б определить внутреннее сопротивление переменному току при напряжении на сетке $U_c = -0{,}5$ В и анодных напряжениях $U_a = 80$; 120; 160 В. Использовать семейство статических анодных характеристик, приведенное на рис. 13.12.

13.52. Используя семейство статических анодно-сеточных характеристик триода 6Н17Б (рис. 13.13),

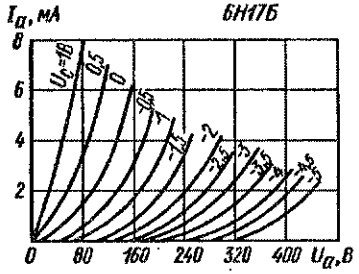

Рис. 13.12

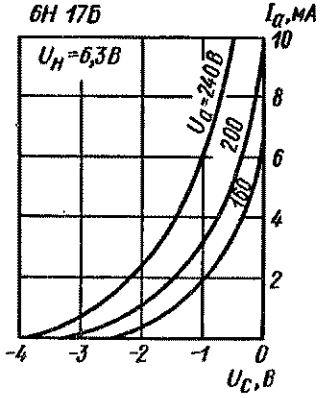

Рис. 13.13

определить внутреннее сопротивление переменному току R_i при напряжении на аноде $U_a = 200$ В и напряжениях на сетке $U_c = -1{,}5$; -2; $-2{,}5$ В.

13.53. Определить мощность, рассеиваемую на аноде триода 6Н28Б-В, при напряжениях на сетке $U_c = -3$ В, на аноде $U_a = 80$ В. Семейство статических анодных характеристик триода 6Н28Б-В приведено на рис. 13.4.

13.54. По семейству статических анодных характеристик триода 6Н28Б-В (см. рис. 13.4) определить напряжение на сетке U_c, при котором в рабочей точке мощность, выделяемая на аноде, $P_a = 0{,}16$ Вт, внутреннее сопротивление постоянному току $R_0 = 10$ кОм.

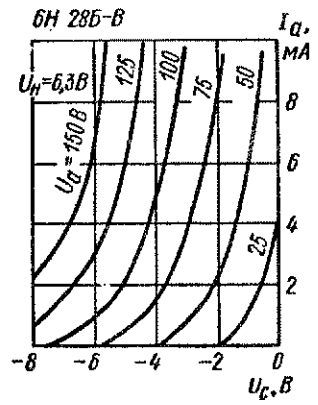

Рис. 13.14

13.55. Используя семейство статических анодно-сеточных характеристик триода 6Н28Б-В (рис. 13.14), определить мощность, рассеиваемую анодом P_a, при напряжении на сетке $U_c = -2$ В и напряжении на аноде $U_a = 75$ В.

13.56. Определить параметры триода, если изменение напряжения на управляющей сетке на $\Delta U_c = 1$ В (при постоянном напряжении на аноде) вызывает изменение анодного тока на $\Delta I_a = 4$ мА, а изменение анодного напряжения на $\Delta U_a = 75$ В (при постоянном напряжении на управляющей сетке) изменяет анодный ток на $\Delta I_a = 5$ мА.

13.57. В триоде, у которого $R_i = 20$ кОм, $\mu = 80$, напряжение на сетке уменьшается (по модулю) на $\Delta U_c = 1{,}5$ В, а напряжение на аноде увеличивается на 40 В. Как изменится анодный ток, если в пределах указанных изменений напряжений параметры триода R_i и μ остаются постоянными?

13.58. Как изменится анодный ток триода при уменьшении (по модулю) сеточного напряжения на $\Delta U_c = 15$ В, если в пределах указанных изменений напряжений параметры триода постоянны: $R_i = 10$ кОм, $S = 3{,}5$ мСм?

13.59. В триоде с параметрами $S = 4$ мСм, $D = 0{,}02$ напряжение на сетке увеличивается (по модулю) на $\Delta U_c = 1$ В при одновременном увеличении напряжения на аноде на $\Delta U_a = 50$ В. Как изменится анодный ток, если в пределах указанных изменений напряжений параметры триода S и D остаются постоянными?

13.60. На рис. 13.15 приведены статические анодные характеристики лучевого тетрода 6П23П. По характеристикам определить область динатронного эффекта. Объяснить зависимость динатронного эффекта от напряжения на управляющей сетке.

13.61. По статическим анодным характеристикам лучевого тетрода 6П23П (рис. 13.15) определить

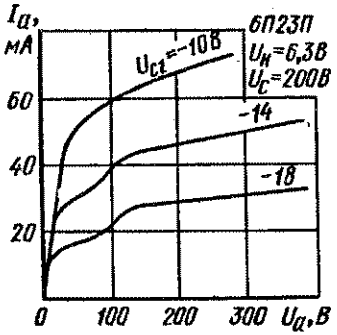

Рис. 13.15

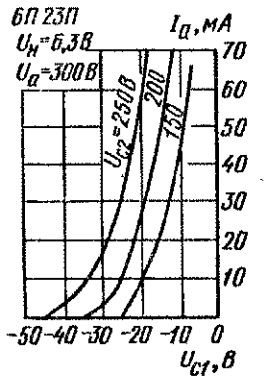

Рис. 13.16

анодный ток I_a при напряжении на аноде $U_a = 250$ В и напряжении на управляющей сетке $U_c = -14$ В.

13.62. По семейству статических анодных характеристик лучевого тетрода 6П23П (рис. 13.15) построить статические анодно-сеточные характеристики, соответствующие напряжениям на аноде $U_{a1} = 150$, $U_{a2} = 250$ В при напряжении на экранирующей сетке $U_{c2} = 200$ В.

13.63. На рис. 13.16 приведено семейство статических анодно-сеточных характеристик лучевого тетрода 6П23П. Определить сопротивление постоянному току тетрода при напряжении на управляющей сетке $U_{c1} = -20$ В и напряжениях на экранирующей сетке $U_{a2} = 150$; 200; 250 В. Построить график зависимости $R_0 = f(U_{c2})$.

13.64. Для лучевого тетрода 6П23П определить крутизну характеристики для точек, соответствующих напряжениям на управляющей сетке $U_{c1} = -15$; -20; -25 В. Напряжение на аноде $U_a = 300$ В, напряжение на экранирующей сетке $U_{c2} = 200$ В.

13.65. Можно ли по внешнему виду различить семейства статических анодных характеристик пентода и лучевого тетрода?

13.66. На рис. 13.17 приведено семейство статических анодных характеристик пентода 6П18П. Определить на нем рабочую область, если известно, что наибольшая мощность, рассеиваемая анодом, $P_a = 12$ Вт.

13.67. Используя семейство статических анодных характеристик пентода 6П18П (рис. 13.17), построить статические анодно-сеточные характеристики для напряжений на аноде $U_a = 120$; 160; 200 В. Напряжение на экранной сетке $U_{c2} = 170$ В.

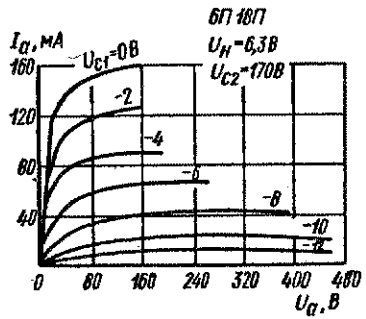

Рис. 13.17

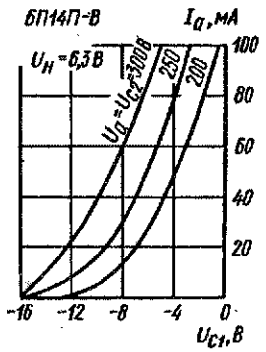

Рис. 13.18

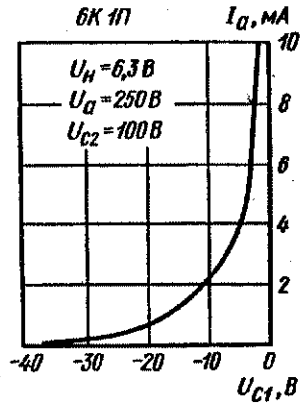

Рис. 13.19

13.68. Для построенного в предыдущей задаче семейства статических анодно-сеточных характеристик определить рабочую область, учитывая, что наибольшая мощность, рассеиваемая анодом, $P_a = 12$ Вт.

13.69. На рис. 13.18 приведено семейство статических анодно-сеточных характеристик пентода 6П14П. Определить для точек, соответствующих напряжениям на управляющей сетке $U_{c1} = -2$; -6; -10 В и напряжениям на экранирующей сетке $U_{c2} = 200$; 250; 300 В, сопротивления пентода постоянному току и построить зависимости $R = f(U_{c1})$ при $U_{c2} = 250$ В; $R_0 = f(U_{c2})$ при $U_{c1} = -6$ В.

13.70. Для статической анодно-сеточной характеристики пентода 6П14П, снятой при напряжениях на аноде и экранирующей сетке $U_a = U_{c2} = 250$ В (рис. 13.18), определить крутизну в точках, соответствующих напряжениям на управляющей сетке $U_{c1} = -4$; -8; -12; -16 В. Построить график зависимости крутизны от напряжения на управляющей сетке.

13.71. Для статической анодно-сеточной характеристики пентода 6К1П (рис. 13.19) определить крутизну в точках, соответствующих напряжениям на управляющей сетке $U_{c1} = -5$; -10; -15; -20; -25; -30; -35 В. Построить график зависимости крутизны от напряжения на управляющей сетке.

КАЧЕСТВЕННЫЕ ЗАДАЧИ

13.72 С какой целью в высокочастотные усилительные лампы вводят экранирующую сетку?

13.73. Каково назначение защитной сетки в усилительных лампах?

13.74. Напряжения на каких сетках пентода в большей степени влияют на катодный ток?

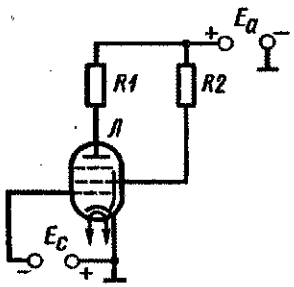

Рис. 13.20

13.75. На рис. 13.20 приведена схема включения пентода. Укажите пути прохождения всех постоянных токов электронной лампы.

13.76. Почему анодно-сеточные характеристики тетродов и пентодов незначительно зависят от анодного напряжения?

13.77. Изобразить схему снятия вольт-амперных характеристик пентода.

13.78. При каких постоянных напряжениях в пентоде снимают анодные и анодно-сеточные характеристики?

13.79. Как напряжение на защитной сетке пентода влияет на ток экранирующей сетки?

13.80. Как изменяется положение анодно-сеточных характеристик пентодов при изменении напряжения на экранирующей сетке?

13.81. Для каких электронных ламп управляющую сетку выполняют с переменным шагом?

13.82. Каковы причины возникновения вторичной эмиссии в тетродах?

13.83. При каких напряжениях на аноде в тетроде возникает динатронный эффект?

13.84. Влияет ли динатронный эффект в тетроде на вид анодной характеристики?

13.85. Используя анодно-сеточные характеристики пентода 6П14П (см. рис. 13.18), покажите, зависит ли крутизна характеристики пентода от анодного напряжения.

13.86. Влияет ли напряжение экранирующей сетки на крутизну характеристики пентода?

13.87. Почему внутреннее сопротивление пентода значительно больше, чем триода?

13.88. Почему коэффициент усиления тетрода и пентода значительно выше, чем триода?

13.89. Почему изменится внутреннее сопротивление пентода в триодном включении, т. е. когда экранирующая сетка соединяется с анодом?

13.90. Изменится ли коэффициент усиления пентода при триодном включении?

13.91. Изменится ли крутизна характеристики пентода в триодном включении?

13.92. Назовите межэлектродные емкости в пентоде и сравните их значения.

13.93. Влияет ли густота экранирующей сетки на значение проходной емкости пентода?

13.94. Изменяются ли внутренние емкости при соединении экранирующей сетки с анодом?

13.95. Зависит ли внутреннее сопротивление пентода от густоты экранирующей сетки?

13.96. В каких пентодах, низкочастотных или высокочастотных, применяется более густая экранирующая сетка?

13.97. Изобразите условное начертание гептода. Каково назначение всех электродов в гептоде?

13.98. Каково назначение комбинированной лампы 6И1П? Как ее изображают в схемах?

13.99. Объясните назначение всех электродов в комбинированной лампе 6И1П.

Глава 14
ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ПРИБОРЫ

ОСНОВНАЯ ФОРМУЛА

Сопротивление ограничительного резистора (рис. 14.1)

$$R_{огр}=(U_{вх}-U_{ст})/(I_{ст}+I_{н}), \qquad (14.1)$$

где $U_{вх}$ — напряжение на входе стабилитрона; $U_{ст}$ — напряжение и ток стабилизации; $I_{н}$ — ток нагрузки.

ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ С РЕШЕНИЯМИ

14.1. Стабилитрон включен по схеме рис. 14.1. Определить ток, проходящий через стабилитрон, если известны $R_{огр}=2$ кОм; $R_{н}=10$ кОм; $U_{вх}=160$ В; $U_{ст}=105$ В.

Решение. Из выражения (14.1) найдем общий ток, проходящий через ограничительное сопротивление:

$$I_{общ}=(U_{вх}-U_{ст})/R_{огр}=(160-105)/(2\cdot 10^{3})=27{,}5 \text{ мА}.$$

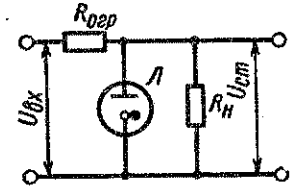

Рис. 14.1

Токи, проходящие:

через нагрузку

$$I_н = U_{ст}/R_н = 105/(10 \cdot 10^3) = 10{,}5 \text{ мА};$$

через стабилитрон

$$I_{ст} = I_{общ} - I_н = 27{,}5 - 10{,}5 = 17 \text{ мА}.$$

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

14.2. Объясните принцип работы стабилитрона.

14.3. Изобразите вольт-амперную характеристику стабилитрона. Определите по ней область стабилизации напряжения.

14.4. Изобразите схему включения стабилитрона для стабилизации напряжения на нагрузке.

14.5. Для чего последовательно со стабилитроном включается резистор?

14.6. Каким образом можно увеличить стабилизированное напряжение?

14.7. Можно ли включать стабилитроны параллельно друг другу? Увеличивается ли при этом область стабилизации по току?

14.8. Стабилизируется ли напряжение на нагрузке, включенной последовательно со стабилитроном?

14.9. Стабилитрон СГ15П-2 имеет напряжение стабилизации $U_{ст\,min} = 102$ В, $U_{ст\,max} = 110$ В при токе $I_{ст\,min} = 5$ мА, $I_{ст\,max} = 30$ мА. Определить допустимые пределы изменения напряжения источника питания в режиме стабилизации напряжения на нагрузке, если известно, что сопротивление нагрузки $R_н = 12$ кОм, сопротивление ограничительного резистора $R_{огр} = 3{,}9$ кОм.

14.10. Для стабилизации напряжений на нагрузке $R_н = 15$ кОм используют стабилитрон, у которого напряжение стабилизации $U_{ст} = 106$ В, средний ток $I_{ст.ср} = 17{,}5$ мА. Определить сопротивление ограничительного резистора, если среднее значение напряжения источника питания $U_{ср} = 250$ В.

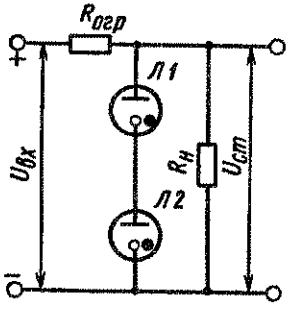

Рис. 14.2

14.11. Два одинаковых стабилитрона включены последовательно для стабилизации напряжения $U_{ст} = 210$ В (рис. 14.2). Определить сопротивление ограничительного резистора $R_{огр}$, если через каждый стабилитрон проходит ток $I_{ст} = 25$ мА; сопротивление нагрузки $R_н = 21$ кОм. Напряжение на входе схемы $U_{вх} = 280$ В.

14.12. Объясните принцип работы тиратрона.

14.13. В каких устройствах могут использоваться тиратроны?

14.14. Можно ли управлять анодным током тиратрона после момента зажигания?

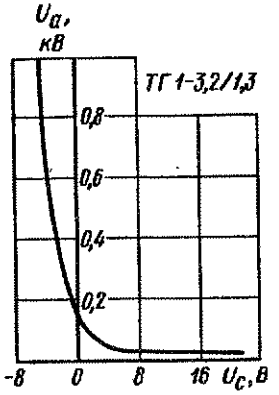

Рис. 14.3

14.15. Для какой цели в цепи анода и сетки тиратрона включают резисторы?

14.16. Зависит ли время деионизации в тиратроне от наполняющего газа?

14.17. Как связана наибольшая частота переменного напряжения, которое может выпрямлять тиратрон, с временем деионизации тиратрона?

14.18. На рис. 14.3 приведена пусковая характеристика тиратрона ТГ1-3,2/1,3. Определить, при каком наименьшем напряжении на сетке произойдет зажигание разряда в тиратроне, если напряжение на аноде $U_а = 0{,}4$ кВ.

14.19. При каком наименьшем значении напряжения на аноде произойдет зажигание разряда в тиратроне ТГ1-3,2/1,3 (рис. 14.3), если напряжение на сетке $U_с = 4$ В?

14.20. Будет ли зажигаться разряд в тиратроне ТГ1-3,2/1,3 (рис. 14.3) при напряжениях на аноде $U_а = 0{,}5$ кВ и на сетке $U_с = -6$ В?

14.21. От каких факторов зависит ширина пусковой области тиратрона?

14.22. Известно, что при температуре $t = 15$ °С тиратрон ТР1-5/20 зажигался при напряжениях на аноде $U_а = 16$ кВ и на сетке $U_с = -16$ В. Будет ли он зажигаться при данных напряжениях в случае увеличения температуры окружающей среды до 45 °С?

Глава 15
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ И УРАВНЕНИЯ

Сопротивление диода постоянному току

$$R_0 = U_a / I_a, \qquad (15.1)$$

где U_a — напряжение на диоде в прямом направлении, В; I_a — ток через диод в прямом направлении, А.

Сопротивление диода переменному току (дифференциальное сопротивление)

$$R_i = \Delta U_a / \Delta I_a, \qquad (15.2)$$

где ΔU_a — изменение прямого напряжения, В; ΔI_a — изменение прямого тока под действием изменения прямого напряжения, А.

Крутизна вольт-амперной характеристики диода

$$S = \Delta I_a / \Delta U_a. \qquad (15.3)$$

Мощность потерь на аноде диода

$$P_a = I_a U_a. \qquad (15.4)$$

Входное сопротивление транзистора переменному току

$$R_{вх} = \Delta U_{вх} / \Delta I_{вх}, \qquad (15.5)$$

где $\Delta U_{вх}$ — изменение входного напряжения, В; $\Delta I_{вх}$ — изменение входного тока под действием изменения входного напряжения, А.

Коэффициенты:

усиления тока базы в схеме с общим эмиттером

$$h_{21э} = \Delta I_к / \Delta I_б, \qquad (15.6)$$

передачи тока эмиттера в схеме с общей базой

$$h_{21б} = \Delta I_к / \Delta I_э, \qquad (15.7)$$

где $\Delta I_к$, $\Delta I_б$, $\Delta I_э$ — изменения токов коллектора, базы и эмиттера.

Связь между коэффициентом усиления тока базы $h_{21э}$ и коэффициентом передачи тока эмиттера $h_{21б}$

$$h_{21э} = h_{21б} / (1 - h_{21б}). \qquad (15.8)$$

Мощность потерь на коллекторе

$$P_к = I_к U_к, \qquad (15.9)$$

где $I_к$ — ток коллектора, А; $U_к$ — напряжение на коллекторе, В.

ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ С РЕШЕНИЯМИ

15.1. В транзисторе КТ315А, включенном по схеме с общим эмиттером, ток базы изменился на 0,1 мА. Определить изменение тока эмиттера, если коэффициент передачи тока базы $h_{21б} = 0{,}975$.

Решение. Используя (15.6) и (15.8), определяем изменение тока коллектора:

$$\Delta I_К = h_{21э} \Delta I_Б = h_{21б} \Delta I_Б / (1 - h_{21б}) = 0{,}975 \cdot 0{,}1 / (1 - 0{,}975) = 3{,}9 \text{ мА}.$$

Находим изменение тока эмиттера:

$$\Delta I_Э = \Delta I_К + \Delta I_Б = 3{,}9 + 0{,}1 = 4 \text{ мА}.$$

15.2. По семейству выходных характеристик транзистора КТ339А в схеме с общим эмиттером (рис. 15.1) определить ток базы $I_Б$ и напряжение на коллекторе $U_К$ в рабочей точке А, в которой ток коллектора $I_К = 6$ мА, а мощность, рассеиваемая на коллекторе, $P_К = 72$ мВт.

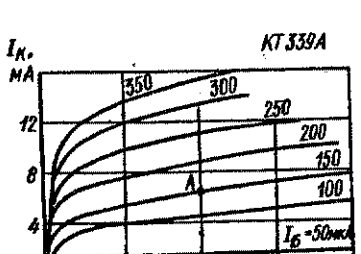

Рис. 15.1

Решение. Используя (15.9), определяем напряжение на коллекторе: $U_К = P_К / I_К = 72 \times \times 10^{-3} / (6 \cdot 10^{-3}) = 12$ В. Таким образом, положение рабочей точки A на выходных характеристиках определяется значениями $I_К = 6$ мА, $U_К = 12$ В. Находим положение рабочей точки A на выходных характеристиках транзистора КТ339А (рис. 15.1) и определяем ток базы: $I_Б = 150$ мкА.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

15.3. По вольт-амперной характеристике кремниевого выпрямительного диода КД103А при $t = 20°$ С (рис. 15.2) определить сопротивление постоянному току при прямом включении для напряжений $U_{пр} = 0{,}4$; 0,6; 0,8 В. Построить график зависимости $R_0 = f(U_{пр})$.

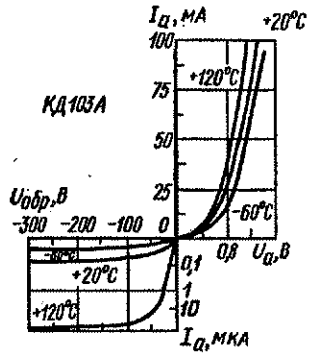

Рис. 15.2

15.4. Используя вольт-амперную характеристику диода КД103А при $t=20°$ С (рис. 15.2), определить сопротивление постоянному току при обратном включении для напряжений $U_{обр}=-50$; -100; -200 В. Построить график зависимости $R_0=f(U_{обр})$.

15.5. Построить зависимость сопротивления постоянному току диода КД103А при прямом включении от температуры окружающей среды, используя характеристики, представленные на рис. 15.2, для $U_{пр}=0{,}4$; 0,6; 0,8 В.

15.6. Используя вольт-амперную характеристику диода КД103А при $t=20°$ С (рис. 15.2), определить дифференциальное сопротивление и крутизну прямой ветви для напряжения $U_{пр}=0{,}8$ В.

15.7. Определить дифференциальное сопротивление и крутизну обратной ветви вольт-амперной характеристики диода КД103А при $t=20°$ С (рис. 15.2) для напряжения $U_{обр}=-50$ В.

15.8. Построить график зависимости сопротивления постоянному току диода КД103А при обратном включении от температуры окружающей среды, используя вольт-амперные характеристики рис. 15.2, для напряжения $U_{обр}=-50$; -100 В.

15.9. По вольт-амперным характеристикам диода КД103А (рис. 15.2) определить изменения прямого тока при изменении температуры от -60 до $+120°$ С для значений $U_{пр}=0{,}4$; 0,6; 0,8, 1 В.

15.10. По вольт-амперным характеристикам диода КД103А (рис. 15.2) определить изменения обратного тока при изменении температуры от -60 до $+120°$ С для значений $U_{обр}=-50$; -100; -200 В.

15.11. Для диода Д312 при изменении прямого напряжения от 0,2 до 0,8 В прямой ток увеличивается от 2,5 до 16 мА. Определить крутизну характеристики и дифференциальное сопротивление диода.

15.12. Определить изменение прямого тока для диода Д311А, если известно, что при изменении

прямого напряжения $U_{пр}$ от 0,2 до 0,6 В крутизна характеристики $S=150$ мСм.

15.13. При изменении прямого напряжения $U_{пр}$ от 0,2 до 0,4 В дифференциальное сопротивление диода $R_i=36{,}4$ Ом. Определить изменение прямого тока диода.

15.14. Во сколько раз изменится прямой ток диода КД103А при увеличении температуры от -60 до 120° С для $U_{пр}=0{,}4$; 0,6; 0,8 В? Вольт-амперные характеристики диода КД103А приведены на рис. 15.2.

15.15. Используя вольт-амперные характеристики диода КД103А (рис. 15.2), определить изменения обратного тока диода при увеличении температуры от -60 до 120° С для значений $U_{обр}=-50$; -100; -200 В.

15.16. Определить, на сколько изменится прямое сопротивление опорного диода Д814А, если при токе стабилизации $I_{ст}=5$ мА напряжение стабилизации изменяется от 7 до 8,5 В.

15.17. Какое напряжение можно стабилизировать на нагрузке при последовательном включении двух опорных диодов Д814Г, каждый из которых имеет напряжение стабилизации $U_{ст}=10\div12$ В?

15.18. Как можно включить в электрическую цепь два однотипных полупроводниковых диода, рассчитанных на максимально допустимый ток 100 мА каждый, если в цепи проходит ток $I=150$ мА?

15.19. Для диодов КД103А наибольшее обратное напряжение $U_{обр}=50$ В. Как можно включить такие диоды в цепь, в которой имеется напряжение $U=80$ В?

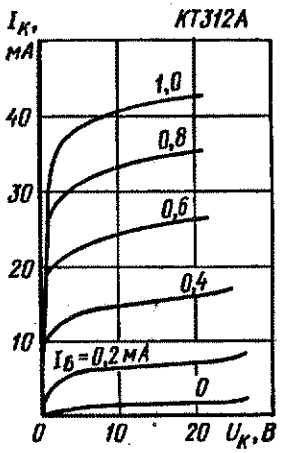

Рис. 15.3

15.20. Для транзистора КТ312А обратный ток коллектора $I_К=10$ мкА при напряжении $U_К=15$ В. Определить обратное сопротивление коллекторного перехода постоянному току.

15.21. Для транзистора КТ312А мощность, рассеиваемая на коллекторе, $P_К=225$ мВт. Используя семейство выходных характеристик транзистора КТ312А в схеме с общим эмиттером (рис. 15.3), определить рабочую область,

учитывая, что наибольшее допустимое напряжение на коллекторе $U_К = 20$ В.

15.22. Для транзистора КТ312А статический коэффициент усиления тока базы $h_{21Э} = 10 \div 100$. Определить, в каких пределах может изменяться коэффициент передачи тока эмиттера $h_{21б}$.

15.23. Для транзистора ГТ109А коэффициент передачи тока эмиттера $h_{21Б} = 0{,}95 \div 0{,}98$. Определить, в каких пределах может изменяться коэффициент усиления тока базы.

15.24. При каком способе включения транзистора входной ток не усиливается?

15.25. Используя семейство выходных характеристик транзистора КТ312А в схеме с общим эмиттером (рис. 15.3), определить значение тока коллектора $I_К$ при напряжении на коллекторе $U_К = 15$ В для значений тока базы $I_Б = 0{,}2$; 0,4; 0,6; 0,8 мА. Построить график зависимости $I_К = f(I_Б)$.

15.26. По семейству выходных характеристик транзистора КТ312А в схеме с общим эмиттером (рис. 15.3) определить значения коэффициентов усиления тока базы $h_{21Э}$ при напряжениях на коллекторе $U_К = 5$; 10; 15 В и токе базы $I_Б = 0{,}4$ мА. Построить зависимость $h_{21Э} = f(U_К)$.

15.27. По входной характеристике транзистора КТ312А в схеме с общим эмиттером определить входное сопротивление переменному току $R_{вх}$ при напряжении на коллекторе $U_К = 5$ В и напряжениях на базе $U_Б = 0{,}3$; 0,4; 0,5 В. Построить зависимость $R_{вх} = f(U_Б)$.

15.28. Почему входные характеристики транзисторов приводятся обычно только для двух значений напряжения коллектора?

15.29. По семейству выходных характеристик транзистора КТ312А в схеме с общим эмиттером (рис. 15.3) определить значения коэффициентов усиления тока базы $h_{21Э}$ при напряжении на коллекторе $U_К = 15$ В для токов базы $I_Б = 0{,}2$; 0,4; 0,6; 0,8 мА. Построить график зависимости $h_{21Э} = f(U_К)$.

15.30. Используя семейство выходных характеристик транзистора КТ312А в схеме с общим эмиттером (рис. 15.3), определить выходное сопротивление транзистора при токе базы $I_Б = 0{,}6$ мА и напряжениях на коллекторе $U_К = 5$; 10; 15 В. Построить график зависимости $R_{вых} = f(U_К)$.

15.31. По семейству выходных характеристик транзистора КТ312А в схеме с общим эмиттером (рис. 15.3) определить выходное сопротивление транзистора при напряжении на коллекторе $U_К = 10$ В и токах базы $I_Б = 0{,}2$; 0,4; 0,6; 0,8 мА. Построить график зависимости $R_{вых} = f(I_Б)$.

15.32. По семейству выходных характеристик транзистора КТ312А в схеме с общим эмиттером (рис. 15.3) определить напряжение на коллекторе $U_К$, при котором проходит ток коллектора $I_К = 31{,}5$ мА, а ток базы $I_Б = 0{,}8$ мА. Оцените мощность, рассеиваемую коллектором в данном режиме.

15.33. Для транзистора КТ339А, включенного по схеме с общей базой, при изменении тока эмиттера на 10 мА ток коллектора изменяется на 9,7 мА. Определить коэффициент усиления по току для транзистора в схеме с общим эмиттером.

15.34. На рис. 15.4 приведено семейство выходных характеристик транзистора ГТ403А в схеме с общей базой. Определить коэффициент передачи тока эмиттера $h_{21б}$ для напряжения на коллекторе $U_К = 8$ В и токов эмиттера $I_Э = 0{,}2$; 0,4; 0,6; 0,8 А. Построить график зависимости $h_{21б} = f(I_Э)$.

15.35. По входной характеристике транзистора ГТ403А в схеме с общей базой (рис. 15.5) определить входное сопротивление переменному току, если

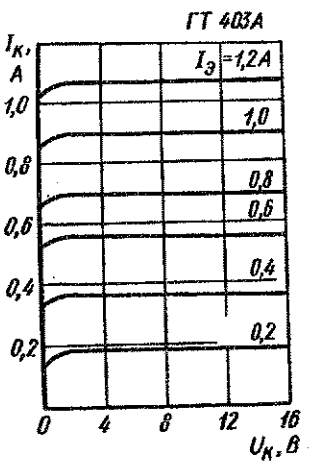

Рис. 15.4

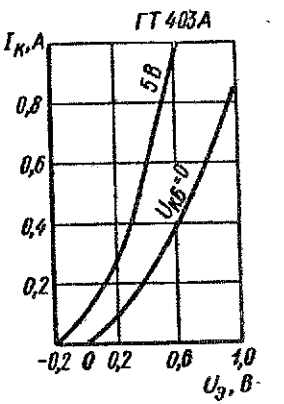

Рис. 15.5

известно, что ток эмиттера изменяется в пределах от 0,15 до 0,35 А.

15.36. Используя входную характеристику транзистора ГТ403А в схеме с общей базой (рис. 15.5), определить входное сопротивление постоянному току для напряжений $U_Э = 0{,}2$; 0,4; 0,6 В.

15.37. Используя входную характеристику транзистора ГТ403А, включенного в схеме с общей базой (рис. 15.5), определить входное сопротивление переменному току при напряжениях $U_Э = 0{,}2$; 0,4; 0,6 В.

15.38. Для транзистора ГТ403А, включенного по схеме с общим эмиттером, ток коллектора изменяется на 140 мА, а ток эмиттера — на 145 мА. Определить коэффициент усиления тока базы.

15.39. Для транзистора КТ315А, включенного по схеме с общим эмиттером, входное сопротивление переменному току $R_{вх} = 160$ Ом. Определить входное сопротивление транзистора в схеме с общей базой, если коэффициент передачи тока эмиттера $h_{21Б} = 0{,}96$.

15.40. Для транзистора КТ339А, семейство выходных характеристик которого в схеме с общим эмиттером приведено на рис. 15.1, определить токи коллектора $I_К$ и базы $I_Б$ в рабочей точке А, если напряжение на коллекторе $U_К = 10$ В, а сопротивление постоянному току $R_0 = 1{,}25$ кОм.

15.41. Используя семейство выходных характеристик транзистора КТ339А в схеме с общим эмиттером (см. рис. 15.1), определить ток базы $I_Б$ и напряжение на коллекторе $U_К$ в рабочей точке A, если ток коллектора $I_К = 12$ мА, а сопротивление постоянному току $R_0 = 333$ Ом.

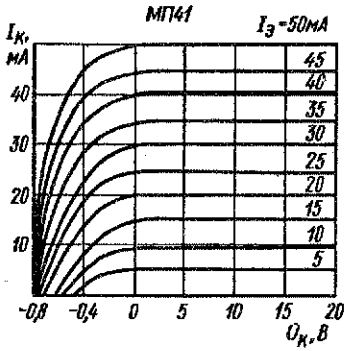

Рис. 15.6

15.42. По семейству выходных характеристик транзистора МП41 в схеме с общей базой (рис. 15.6) определить изменение тока коллектора, если при коллекторном напряжении $U_К = 10$ В ток эмиттера меняется от 15 до 35 мА.

15.43. Для транзистора МП41 в схеме с общей базой, семейство выходных характеристик которого приведено на рис. 15.6, определить в рабочей точке A ток эмиттера $I_Э$, ток коллектора $I_К$ и напряжение на коллекторе $U_К$, если мощность потерь на коллекторе $P_К = 150$ мВт, а сопротивление постоянному току $R_0 = 402$ Ом.

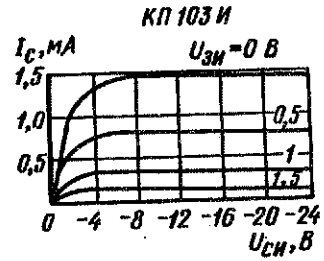

Рис. 15.7

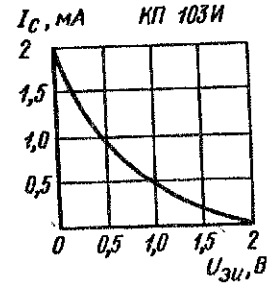

Рис. 15.8

15.44. Используя семейство выходных характеристик транзистора МП41 в схеме с общей базой (рис. 15.6), определить мощность, рассеиваемую на коллекторе, при напряжении $U_Э = 5$ В и токе эмиттера $I_Э = 30$ мА.

15.45. По семейству выходных (стоковых) характеристик полевого транзистора КП103И (рис. 15.7) определить рабочую область, если наибольшая мощность, рассеиваемая стоком, $P_{С\,max} = 120$ мВт.

15.46. По семейству выходных (стоковых) характеристик полевого транзистора КП103И (рис. 15.7) построить стокозатворную характеристику $I_С = f(U_{ЗИ})$ для напряжения $U_{СИ} = 10$ В.

15.47. Для полевого транзистора КП103И (рис. 15.7) определить сопротивление постоянному току R_0 при напряжении $U_{СИ} = 10$ В и напряжениях $U_{ЗИ} = 0{,}5$; 1,0; 1,5 В.

15.48. По стокозатворной характеристике полевого транзистора КП103И (рис. 15.8) определить крутизну характеристики S при $U_{ЗИ} = 1{,}5$; 1,0; 0,5 В. Построить зависимость $S = f(U_{ЗИ})$.

КАЧЕСТВЕННЫЕ ЗАДАЧИ

15.49. Как образуется примесный полупроводник?

15.50. Чем определяется проводимость примесных полупроводников?

15.51. Объясните процесс образования полупроводников p- и n-типов.

15.52. Какие исходные материалы используются для изготовления полупроводников?

15.53. Какие подвижные носители являются основными в полупроводниках p- и n-типов?

15.54. За счет чего образуются диффузия и дрейф носителей в полупроводнике?

15.55. Изменится ли сопротивление примесного полупроводника с изменением температуры?

15.56. Объясните образование p-n-перехода.

15.57. Объясните физический смысл прямого и обратного включения p-n-перехода.

15.58. В каком направлении перемещаются электроны через p-n-переход за счет диффузии и дрейфа?

15.59. В каком направлении перемещаются дырки через p-n-переход за счет диффузии и дрейфа?

15.60. Зависит ли толщина p-n-перехода от его способа включения (прямое и обратное)?

15.61. Как обозначают на схемах полупроводниковые диоды различного назначения?

15.62. Изобразите схему для снятия прямой ветви вольт-амперной характеристики диода.

15.63. Изобразите схему для снятия обратной ветви вольт-амперной характеристики диода.

15.64. Изобразите схему включения опорного диода.

15.65. Сколько p-n-переходов имеется в полупроводниковом диоде?

15.66. Отличаются ли по внешнему виду вольт-амперные характеристики германиевого и кремниевого полупроводниковых диодов?

15.67. Какая ветвь вольт-амперной характеристики используется в опорном диоде?

15.68. Изобразите вольт-амперную характеристику туннельного диода.

15.69. Объясните, зависит ли емкость p-n-перехода от его типа (точечный или плоскостной).

15.70. Каковы значения рабочих областей напряжений при прямом включении германиевых и кремниевых выпрямительных диодов?

15.71. Чем ограничивается наибольший прямой ток через диод?

15.72. В области каких температур могут работать германиевые и кремниевые выпрямительные диоды?

15.73. Как меняется обратный ток полупроводникового диода с ростом температуры?

15.74. Как обеспечивают тепловой режим в мощных диодах?

15.75. Чем обусловлен обратный ток коллектора в транзисторе?

15.76. Сколько и каких переходов в транзисторах типов p-n-p и n-p-n?

15.77. Приведите условные изображения транзисторов разных типов на принципиальных схемах.

15.78. В каких пределах может изменяться коэффициент передачи тока эмиттера?

15.79. Почему коэффициент передачи тока базы больше единицы?

15.80. Объясните зависимость обратного тока коллектора от температуры.

15.81. Изобразите возможные схемы включения транзистора.

15.82. Изобразите входную характеристику транзистора при включении с общей базой. Поясните ее.

15.83. Изобразите выходную характеристику транзистора при включении с общим эмиттером. Поясните ее.

15.84. Изобразите, как изменяется входная характеристика транзистора при включении с общим эмиттером при увеличении температуры.

15.85. Изобразите, как изменится выходная характеристика транзистора при включении с общей базой при уменьшении температуры.

15.86. Изобразите семейство выходных характеристик транзистора при включении с общей базой.

15.87. Изобразите семейство входных характеристик транзистора при включении с общим эмиттером.

15.88. Выведите связь между коэффициентами передачи токов эмиттера $h_{21б}$ и базы $h_{21э}$ транзистора.

15.89. Изобразите схему для снятия входных характеристик транзистора.

15.90. Изобразите схему для снятия выходных характеристик транзистора.

15.91. Сравните значения входных сопротивлений транзистора при различных способах включения.

15.92. Сравните значения выходных сопротивлений транзистора при различных способах включения.

15.93. Объясните принцип управления током в полевом транзисторе.

15.94. Каково название и назначение электродов в полевом транзисторе?

15.95. Изобразите выходные стоковые характеристики полевого транзистора в схеме с общим истоком.

15.96. Изобразите стокозатворные характеристики полевого транзистора в схеме с общим истоком.

15.97. Сравните значения выходных сопротивлений биполярных и полевых транзисторов.

15.98. Сравните значения входных сопротивлений биполярных и полевых транзисторов и электронной лампы.

15.99. Приведите условные изображения полевых транзисторов на принципиальных схемах.

15.100. Назовите возможные области применения полевых транзисторов.

15.101. Назовите *p-n*-переходы в динисторе (диодном тиристоре) и тринисторе (триодном тиристоре).

15.102. Назовите электроды динистора и тринистора.

15.103. Изобразите вольт-амперную характеристику динистора. Назовите ее основные области.

15.104. Изобразите вольт-амперную характеристику тринистора. Назовите ее основные области.

15.105. Дайте определение напряжению включения и току включения динистора.

15.106. Как перевести динистор из режима высокой проводимости в режим низкой проводимости?

15.107. Приведите условное изображение динистора на принципиальной схеме.

15.108. Как изменится вольт-амперная характеристика тринистора при уменьшении управляющего тока?

15.109. Приведите условное изображение тринистора на принципиальной схеме.

15.110. Назовите возможные области применения тиристоров.

Глава 16

ФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ И УРАВНЕНИЯ

Удельная чувствительность фоторезистора

$$K_0 = I_\Phi/(\Phi U), \qquad (16.1)$$

где I_Φ — фототок, мкА; Ф — световой поток, лм; U — рабочее напряжение, В.

Интегральная чувствительность:

фоторезистора

$$K_\Phi = I_\Phi/\Phi; \qquad (16.2)$$

фотодиода

$$K_\Phi = I_д/\Phi, \qquad (16.3)$$

где $I_д$ — фототок диода, мкА; Ф — световой поток, лм.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

16.1. Пользуясь вольт-амперными характеристиками фотоэлементов (рис. 16.1), построить световые характеристики $I=f(\Phi)$ при напряжениях питания $U=180$ В.

16.2. Удельная чувствительность фоторезистора $K_0=300$ мкА/мВ при напряжении $U=15$ В. Определить его интегральную чувствительность.

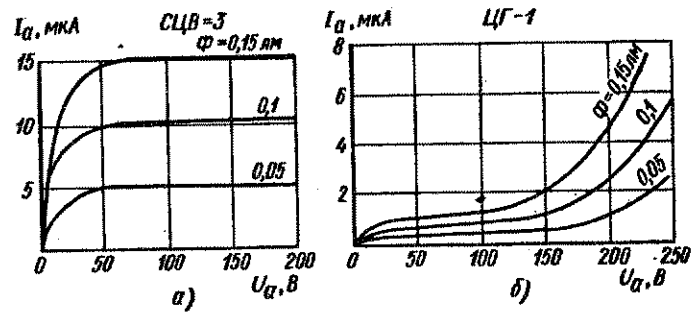

Рис. 16.1

16.3. Определить фототок диода, если на него падает световой поток $\Phi = 0{,}02$ лм, а интегральная чувствительность $K_\Phi = 15.000$ мкА/лм.

КАЧЕСТВЕННЫЕ ЗАДАЧИ

16.4. Из каких материалов выполняют фотокатод в фотоэлементах?

16.5. Какой фотокатод имеет наибольшую чувствительность в инфракрасной области спектра?

16.6. Какой фотокатод имеет наибольшую чувствительность в видимой области спектра?

16.7. Зависит ли фототок от спектрального состава источника света, если световой поток постоянен?

16.8. Объясните физический смысл интегральной чувствительности фотоэлемента.

16.9. Изобразите световые характеристики вакуумного и газонаполненного фотоэлементов. Объясните их качественное различие.

16.10. На рис. 16.1, *а, б* приведены вольт-амперные характеристики вакуумного фотоэлемента СЦВ-3 и газонаполненного ЦГ-1. Объясните качественное различие характеристик.

16.11. Изобразите и сравните частотные характеристики вакуумного и газонаполненного фотоэлементов.

16.12. Объясните принцип работы фотоэлектронного умножителя.

16.13. Чем ограничивается чувствительность фотозлектронных приборов?

16.14. Изобразите темновую вольт-амперную характеристику фотодиода. Объясните ее особенности.

16.15. Как изменяется ток через фотодиод с изменением температуры?

16.16. За счет чего увеличивается чувствительность фототранзистора по сравнению с фотодиодом?

16.17. Сколько *p-n*-переходов имеет фототранзистор?

16.18. Изобразите выходные вольт-амперные характеристики фототранзистора. Сравните их с выходными вольт-амперными характеристиками биполярного транзистора.

16.19. Изобразите возможные схемы включения фототранзисторов.

16.20. Назовите области применения фотоэлектронных приборов.

16.21. Дайте определение микросхемы и интегральной микросхемы.

16.22. Дайте классификацию интегральных микросхем по технологическим принципам их изготовления.

16.23. Какая степень интеграции может иметь место в интегральных микросхемах?

16.24. Дайте классификацию интегральных микросхем по их функциональному назначению.

16.25. Какой материал используется при изготовлении большинства полупроводниковых интегральных микросхем?

16.26. Что представляет собой гибридная интегральная микросхема?

16.27. Какие транзисторы в основном применяются в гибридных интегральных микросхемах?

16.28. Объясните особенности пленочных интегральных микросхем.

16.29. Назовите способы изготовления пассивных элементов интегральных микросхем.

16.30. Каковы особенности технологии совмещенных интегральных микросхем?

16.31. Расскажите о больших интегральных микросхемах.

16.32. Назовите возможные области применения интегральных микросхем.

Глава 17

ЭЛЕКТРОННЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ И УРАВНЕНИЯ

Выпрямленное напряжение для однополупериодного выпрямителя (рис. 17.1)

$$U_0 = U_{2m}/\pi, \qquad (17.1)$$

где U_{2m} — амплитуда напряжения вторичной обмотки трансформатора; для двухполупериодного выпрямителя

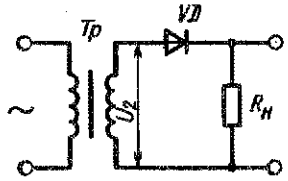

Рис. 17.1

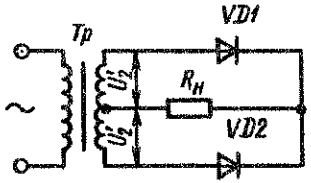

Рис. 17.2

со средней точкой (рис. 17.2) и мостовой схемы (см. рис. 17.4)

$$U_0 = 2U'_{2m}/\pi, \qquad (17.2)$$

где U'_{2m} — половина амплитуды напряжения вторичной обмотки трансформатора.

Наибольшее обратное напряжение, приложенное к диоду:

для однополупериодного выпрямителя и мостовой схемы

$$U_{обр} = U_{2m}; \qquad (17.3)$$

для двухполупериодного выпрямителя со средней точкой

$$U_{обр} = 2U'_{2m}. \qquad (17.4)$$

Коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения

$$k_п = U_{1m}/U_0, \qquad (17.5)$$

где U_{1m} — амплитуда первой гармоники напряжения на нагрузке.

Коэффициент сглаживания

$$q = k_{п\,вх}/k_{п\,вых}, \qquad (17.6)$$

где $k_{п\,вх}$, $k_{п\,вых}$ — коэффициенты пульсаций на входе и выходе сглаживающего фильтра.

ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ С РЕШЕНИЯМИ

17.1. В схеме однополупериодного выпрямителя (см. рис. 17.1) через диод проходит выпрямленный ток $I_0 = 75$ мА. Определить сопротивление нагрузки $R_н$, если амплитуда напряжения вторичной обмотки трансформатора $U_{2m} = 200$ В.

Решение. Согласно (17.1), выпрямленное напряжение на нагрузке $U_0 = U_{2m}/\pi$. Сопротивление нагрузки $R_н = U_0/I_0 = U_{2m}/(\pi I_0) = 220/(3{,}14 \cdot 75 \cdot 10^{-3}) = 850$ Ом.

17.2. Амплитуда напряжения вторичной обмотки трансформатора двухполупериодной схемы выпрямителя (рис. 17.2) $U'_{2m} = 210$ В. Определить выпрямленный ток, проходящий через каждый диод I_0, если сопротивление нагрузки $R_н = 510$ Ом.

Решение. Согласно (17.2), выпрямленное напряжение $U_0 = 2U'_{2m}/\pi$. Ток, проходящий через диод, $I_0 = U_0/(2R_н) = U_{2m}/(\pi R_н) = 210/(3{,}14 \cdot 510) = 131$ мА.

17.3. Для схемы двухполупериодного выпрямителя с индуктивным сглаживающим фильтром (рис. 17.3) определить коэффициент сглаживания q, если известно, что амплитуда напряжения вторичной обмотки трансформатора $U'_{2m} = 300$ В, выпрямленный ток, проходящий через нагрузку, $I_0 = 200$ мА, частота сети $f_c = 50$ Гц, индуктивность дросселя $L_ф = 10$ Гн.

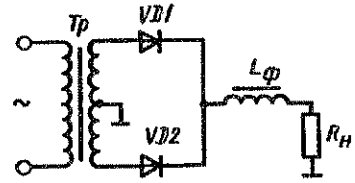

Рис. 17.3

Решение. Выпрямленное напряжение на нагрузке $U_0 = 2U'_{2m}/\pi = 2 \cdot 300/3{,}14 = 191$ В. Сопротивление нагрузки $R_н = U_0/I_0 = 191/(200 \cdot 10^{-3}) = 955$ Ом. Коэффициент сглаживания $q = k_{п\,вх}/k_{п\,вых} = X_{1ф}/R_н = 2\pi f_п L_ф/R_н = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 2 \cdot 50 \cdot 10/955 = 6{,}6$.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

17.4. В схеме однополупериодного выпрямителя (см. рис. 17.1) на нагрузке $R_н = 510$ Ом постоянное напряжение $U_0 = 100$ В. Правильно ли выбран диод Д205, для которого максимальное обратное напряжение $U_{обр} = 400$ В, а наибольший выпрямленный ток $I_0 = 400$ мА?

17.5. Для схемы однополупериодного выпрямителя (см. рис. 17.1) определить выпрямленное напряжение U_0, если амплитуда напряжения первичной обмотки трансформатора $U_{1m} = 220$ В, коэффициент трансформации $n = 1{,}43$.

17.6. Для схемы однополупериодного выпрямителя (см. рис. 17.1) определить постоянное

напряжение на нагрузке, если на вторичной обмотке трансформатора $U_{2m}=250$ В.

17.7. В схеме двухполупериодного выпрямителя (см. рис. 17.2) через нагрузку проходит постоянный ток $I_0=600$ мА. Можно ли в схеме использовать диоды типа Д229В, у которых наибольший средний прямой ток не более 400 мА?

17.8. Определить частоту пульсации первой гармоники напряжения на нагрузке двухполупериодного выпрямителя (см. рис. 17.2), если напряжение первичной обмотки трансформатора имеет частоту $f_c=400$ Гц?

17.9. Для схемы двухполупериодного выпрямителя (см. рис. 17.2) определить выпрямленное напряжение на нагрузке U_0, если действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора $U_2=120$ В.

17.10. В схеме двухполупериодного выпрямителя (см. рис. 17.2) обратное напряжение, действующее на каждый диод, $U_{обр}=471{,}2$ В. Определить выпрямленное напряжение на нагрузке U_0.

17.11. Определить амплитуду переменного напряжения на нагрузке в схеме двухполупериодного выпрямителя (см. рис. 17.2), если выпрямленный ток, проходящий через каждый диод, $I_0=70$ мА, а сопротивление нагрузки $R_н=39$ Ом.

17.12. Частота колебаний пульсации выпрямленного напряжения в схеме двухполупериодного выпрямителя (см. рис. 17.2) $f_c=2$ кГц. Какова частота питающей сети?

17.13. Определить выпрямленное напряжение U_0 на нагрузке двухполупериодной мостовой схемы выпрямителя (рис. 17.4), если амплитуда напряжения первичной обмотки трансформатора $U_{1m}=150$ В, а коэффициент трансформации трансформатора $n=2$.

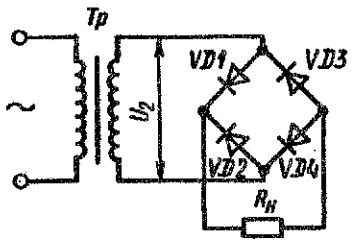

Рис. 17.4

17.14. В двухполупериодной мостовой схеме выпрямителя (рис. 17.4) обратное напряжение на диодах $U_{обр}=235{,}5$ В. Определить ток, проходящий через каждый диод, если сопротивление нагрузки $R_н=390$ Ом.

17.15. Определить действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора в схеме двухполупериодного мостового выпрямителя (рис. 17.4), если через каждый диод идет ток $I_0=150$ мА, а сопротивление нагрузки $R_н=430$ Ом.

17.16. Для двухполупериодной мостовой схемы выпрямителя (рис. 17.4) определить обратное напряжение на диодах, если через каждый диод идет ток $I_0=250$ мА, а сопротивление нагрузки $R_н=680$ Ом.

17.17. Построить схему двухполупериодного мостового выпрямителя с емкостным сглаживающим фильтром и определить коэффициент сглаживания при условии, что амплитуда напряжения вторичной обмотки трансформатора $U_{2m}=250$ В, выпрямленный ток, проходящий через каждый диод, $I_0=50$ мА, частота сети $f_c=400$ Гц, емкость конденсатора фильтра $C_ф=10$ мкФ.

17.18. В схему однополупериодного выпрямителя (см. рис. 17.1) включен емкостный сглаживающий фильтр. Определить емкость конденсатора фильтра, если сопротивление нагрузки $R_н=820$ Ом, частота сети $f_c=50$ Гц, коэффициент сглаживания $q=10$.

17.19. В схему однополупериодного выпрямителя (см. рис. 17.1) включен индуктивный сглаживающий фильтр. Определить индуктивность дросселя, если выпрямленный ток $I_0=75$ мА, выпрямленное напряжение $U_0=120$ В, частота сети $f_c=400$ Гц, коэффициент сглаживания $q=15$.

17.20. В схему двухполупериодного мостового выпрямителя (рис. 17.4) включен индуктивно-емкостный сглаживающий фильтр. Определить элементы фильтра $L_ф$, $C_ф$, если выпрямленный ток, проходящий через каждый диод, $I_0=100$ мА, выпрямленное напряжение на нагрузке $U_0=150$ В, частота сети $f_c=50$ Гц, коэффициент сглаживания $q=q_L q_C=100$.

КАЧЕСТВЕННЫЕ ЗАДАЧИ

17.21. Как выбирают диоды в двухполупериодной схеме выпрямителя?

17.22. Изобразить простейшую схему выпрямителя с удвоением напряжения. Из каких соображений выбирают диоды и конденсаторы в этой схеме?

17.23. Как включают конденсатор сглаживающего фильтра относительно нагрузки? Как выбирают емкость конденсатора?

17.24. Как включают дроссель сглаживающего фильтра относительно нагрузки? Как выбирают индуктивность дросселя?

17.25. Постройте схему двухполупериодного выпрямителя с П-образным фильтром. Укажите область применения фильтра.

17.26. Постройте схему двухполупериодного мостового выпрямителя с Г-образным *RC*-фильтром. Укажите область применения фильтра.

17.27. Как влияет емкость конденсатора сглаживающего фильтра на коэффициент сглаживания?

17.28. Как влияет индуктивность дросселя сглаживающего фильтра на коэффициент сглаживания?

17.29. Почему сглаживающие фильтры типа *RC* применяют только в маломощных выпрямителях?

17.30. Какие сглаживающие фильтры можно применять в мощных выпрямителях?

17.31. В каких случаях в схемах выпрямителей используется последовательное включение диодов? Для какой цели все диоды шунтируются резисторами?

17.32. В каких случаях в схемах выпрямителей используется параллельное включение диодов?

17.33. Какими способами можно изменять выпрямленное напряжение?

17.34. Что представляет собой управляемый выпрямитель? Составьте его структурную схему.

17.35. На рис. 17.5 приведена схема двухполупериодного выпрямителя на тиристорах. Каково назначение элементов схемы?

17.36. В схеме двухполупериодного выпрямителя на тиристорах (рис. 17.5) найдите цепь управления тиристорами и объясните принцип работы.

17.37. В каких пределах можно изменять выпрямленное напряжение в схеме двухполупериодного выпрямителя на тиристорах (рис. 17.5)?

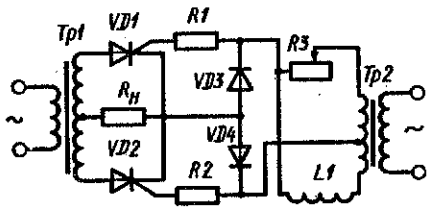

Рис. 17.5

Глава 18
ЭЛЕКТРОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ И УРАВНЕНИЯ

Коэффициент усиления по напряжению

$$K_U = U_{вых}/U_{вх}, \qquad (18.1)$$

где $U_{вых}$, $U_{вх}$ — напряжения на выходе и входе усилителя.

Коэффициент усиления по напряжению, выраженный в децибелах,

$$K_U = 20 \lg K. \qquad (18.2)$$

Коэффициент усиления многокаскадного усилителя

$$K = K_1 K_2 \ldots K_n, \text{ или}$$

$$K_{дБ} = K_{1\,дБ} + K_{2\,дБ} + \ldots + K_{n\,дБ}, \qquad (18.3)$$

где K_1, K_2, ..., K_n — коэффициенты усиления отдельных каскадов.

Коэффициент частотных искажений усилительного каскада

$$M = K_0/K, \qquad (18.4)$$

где K_0 — коэффициент усиления на средних частотах; K — коэффициент усиления на какой-либо частоте рабочего диапазона.

Коэффициент частотных искажений, выраженный в децибелах,

$$M_{дБ} = 20 \lg M. \qquad (18.5)$$

Коэффициент частотных искажений многокаскадного усилителя

$$M_{общ} = M_1 M_2 \ldots M_n, \qquad (18.6)$$

или

$$M_{общ\,дБ} = M_{1\,дБ} + M_{2\,дБ} + \ldots + M_{n\,дБ}.$$

Коэффициент усиления лампового каскада на средних частотах (рис. 18.1)

$$K_0 = \mu R_н/(R_н + R_i), \qquad (18.7)$$

где μ — статический коэффициент усиления электронной лампы; R_i — внутреннее сопротивление

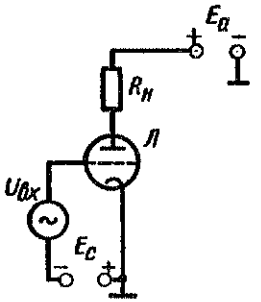

Рис. 18.1

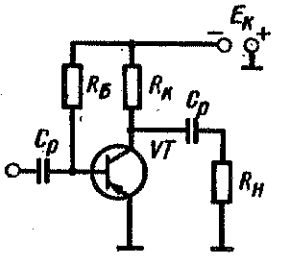

Рис. 18.2

электронной лампы переменному току, Ом; $R_н$ — сопротивление анодной нагрузки, Ом.

Коэффициент усиления транзисторного каскада на средних частотах (рис. 18.2)

$$K_0 = h_{21э} R_н / R_{вх}, \qquad (18.8)$$

где $h_{21э}$ — статический коэффициент усиления тока базы в схеме с общим эмиттером; $R_н$ — сопротивление коллекторной нагрузки, Ом; $R_{вх}$ — входное сопротивление транзистора, Ом.

Сопротивление автоматического смещения в цепи катода лампового усилительного каскада

$$R_К = E_c / I_{К0}, \qquad (18.9)$$

где E_c — напряжение смещения, В; $I_{К0}$ — постоянная составляющая катодного тока, А.

Напряжение смещения в транзисторном каскаде при использовании схемы эмиттерной температурной стабилизации (рис. 18.3)

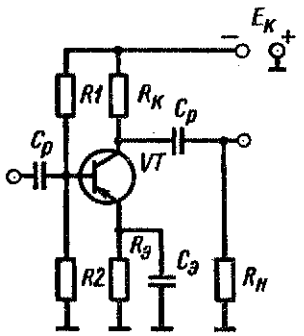

Рис. 18.3

$$U_{БЭ} = I_{дел} R_2 - I_{Э0} R_Э, \qquad (18.10)$$

где $I_{дел} = E_К / (R1 + R2)$ — постоянный ток делителя в цепи базы транзистора; $I_{Э0}$ — постоянная составляющая тока эмиттера, А.

Емкость блокировочного конденсатора в цепи катода (эмиттера)

$$C \geq 10 / (2\pi f_н R), \qquad (18.11)$$

где $f_н$ — нижняя частота спектра усиливаемых колебаний, Гц; R — сопротивление резистора в цепи катода (эмиттера), Ом.

Электрический КПД усилителя

$$\eta = P_{вых} / P_0, \qquad (18.12)$$

где $P_{вых}$ — выходная мощность усилителя; P_0 — мощность, расходуемая источником коллекторного (анодного) питания.

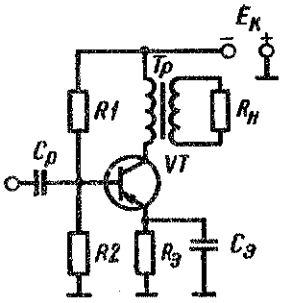

Рис. 18.4

Мощность, выделяемая в нагрузке,

$$P_н = \eta_т P_{вых}, \qquad (18.13)$$

где $\eta_т$ — КПД выходного трансформатора; $P_{вых}$ — мощность, отдаваемая транзистором.

Сопротивление нагрузки, пересчитанное в первичную обмотку трансформатора (приведенное сопротивление) (рис. 18.4),

$$R'_н = R_н / n^2, \qquad (18.14)$$

где $R_н$ — сопротивление нагрузки; n — коэффициент трансформации выходного трансформатора.

Коэффициент усиления каскада, охваченного отрицательной обратной связью,

$$K^*_0 = K_0 / (1 + K_{ос} K_0), \qquad (18.15)$$

где K_0 — коэффициент усиления каскада до введения ООС; $K_{ос}$ — коэффициент обратной связи.

Добротность колебательного контура

$$Q = Z_в / r_К, \qquad (18.16)$$

где $Z_в$ — волновое сопротивление контура, Ом; $r_К$ — сопротивление потерь, Ом.

ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ С РЕШЕНИЯМИ

18.1. На нижней граничной частоте двухкаскадного усилителя коэффициент частотных искажений второго каскада $M_{н2} = 1{,}3$ при общем коэффициенте частотных искажений $M_н = 1{,}41$. На средних частотах усиление усилителя $K_0 = 200$ и усиление второго

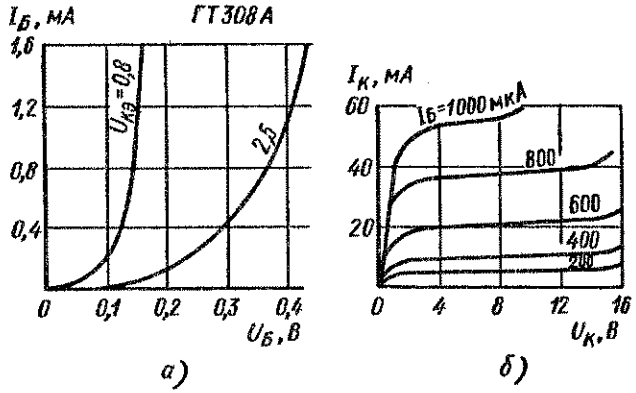

Рис. 18.5

каскада $K_{02}=10$. Определить напряжение на выходе первого каскада на нижней граничной частоте, если входное напряжение усилителя для всех частот одинаково: $U_{вх}=50$ мВ.

Решение. Напряжение на выходе первого каскада на средних частотах

$$U_{вых}=U_{вх}K_{01}=U_{вх}K_0/K_{02}=50\cdot10^{-3}\cdot200/10=1\text{ В}.$$

На нижней граничной частоте напряжение на выходе первого каскада

$$U_{вых\,н1}=U_{вых\,1}/M_{н1}=\frac{U_{вых\,1}}{M_н/M_{н2}}=\frac{1}{1{,}41/1{,}3}=0{,}92\text{ В}.$$

18.2. Усилитель на транзисторе ГТ308А собран по схеме рис. 18.3. Пользуясь входными и выходными характеристиками транзистора ГТ308А (рис. 18.5, *а*, *б*), определить положение рабочей точки *А*, если известно, что $R_К=240$ Ом, $R1=3$ кОм, $R2=100$ Ом, $E_К=10$ В.

Решение. Определяем напряжение смещения базы:

$$U_{БЭ}=E_К R_2/(R1+R2)=10\cdot100/(3000+100)=0{,}32\text{ В}.$$

По входной характеристике транзистора при напряжении $U_К=2{,}5$ В находим ток базы в рабочей точке: $I_{Б0}=0{,}6$ мА. На выходных характеристиках транзистора строим нагрузочную прямую по точкам $I_К=0$ при $U_К=E_К=10$ В, $I_К=E_К/R_К=10/240=42$ мА

при $E_К=0$. Рабочая точка *А* является точкой пересечения нагрузочной прямой с выходной характеристикой для $I_{Б0}=600$ мкА. В рабочей точке *А* $I_{К0}=21$ мА, $U_К=4{,}7$ В.

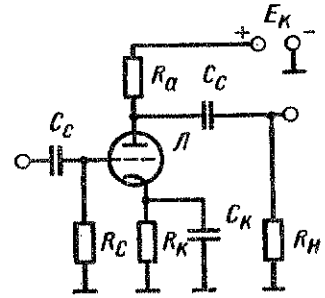

Рис. 18.6

18.3. В усилительном каскаде на ламповом триоде (рис. 18.6) напряжение смещения $E_с$ обеспечивается автоматически за счет катодного тока. Определить сопротивление резистора в цепи катода $R_К$ и емкость конденсатора, шунтирующего резистор $C_К$, если требуемое напряжение смещения $E_с=-4{,}5$ В, катодный ток в рабочей точке $I_{К0}=15$ мА, диапазон усиливаемых частот $f=30\div4000$ Гц.

Решение. Пользуясь формулой (18.9), определяем сопротивление резистора в цепи катода:

$$R_К=E_с/I_{К0}=4{,}5/(15\cdot10^{-3})=300\text{ Ом}.$$

Емкость конденсатора $C_К$ выбираем из условия

$$1/(2\pi f_{min}C_К)\leqslant R_К/10,$$

отсюда

$$C_К\geqslant10/(2\pi f_{min}R_К)=10/(2\cdot3{,}14\cdot30\cdot300)=17{,}6\text{ мкФ}.$$

Выбираем $C_К=20$ мкФ.

18.4. Из расчета усилительного каскада (см. рис. 18.3) известно, что ток базы $I_{Б0}=50$ мкА, ток эмиттера $I_{Э0}=5$ мА, напряжение $U_{БЭ}=0{,}8$ В, напряжение $E_К=10$ В. Рассчитать элементы температурной стабилизации.

Решение. Для увеличения стабилизирующего действия схемы сопротивление резистора $R_Э$ следует выбирать как можно большим. Однако при увеличении $R_Э$ уменьшается напряжение на транзисторе $U_К$. Поэтому $R_Э$ определяем из условия

$$U_Э=I_{Э0}R_Э=(0{,}1\div0{,}2)E_К.$$

Выбираем $U_Э=0{,}2E_К=2$ В, тогда $R_Э=U_Э/I_{Э0}=2/(5\cdot10^{-3})=400$ Ом. Таким образом, для получения требуемого напряжения $U_{БЭ}=0{,}8$ В необходимо на делителе напряжения обеспечить $U_{дел}=U_Э+U_{БЭ}=2{,}8$ В.

Сопротивления резисторов $R1$, $R2$ выбираем так, чтобы ток делителя $I_{дел}=E_К/(R1+R2)$ был намного больше тока базы $I_{Б0}$ и чтобы изменения последнего не влияли на напряжение $U_{дел}$. Обычно $I_{дел}=(3\div 10)I_{Б0}$. Выбираем $I_{дел}=10I_{Б0}=500$ мкА $=0{,}5$ мА, тогда

$$R1+R2=E_К/I_{дел}=10/(0{,}5\cdot 10^{-3})=20 \text{ кОм}.$$

Находим

$$R2=U_{дел}/I_{дел}=2{,}8/(0{,}5\cdot 10^{-3})=5{,}6 \text{ кОм}$$

и

$$R1=(R1+R2)-R2=20-5{,}6=14{,}4 \text{ кОм}.$$

18.5. В транзисторном усилительном каскаде (рис. 18.7) мощность входного сигнала $P_{вх}=0{,}150$ мВт при входном токе $I_{вх}=500$ мкА. Определить коэффициент усиления каскада по напряжению, если сопротивление резистора в цепи коллектора $R_К=4700$ Ом, сопротивление нагрузки $R_н=350$ Ом, а статический коэффициент усиления тока базы $h_{21Э}=40$.

Решение. Определяем входное сопротивление каскада:

$$R_{вх}=P_{вх}/I^2_{вх}=0{,}15\cdot 10^{-3}/(500\cdot 10^{-6})^2=600 \text{ Ом}.$$

Определяем сопротивление эквивалентной нагрузки в коллекторной цепи каскада:

$$R'_н=R_К R_н/(R_К+R_н)=4700\cdot 350/(4700+350)=325 \text{ Ом}.$$

Определяем коэффициент усиления каскада по напряжению:

$$K=h_{21Э}R'_н/R_{вх}=40\cdot 325/600=21{,}7.$$

18.6. В трехкаскадном усилителе первый каскад, имеющий коэффициент усиления $K_1=20$, охвачен цепью отрицательной обратной связи с коэффициентом $K_{ос1}=0{,}01$, а два других каскада охвачены общей цепью отрицательной связи при коэффициенте $K_{ос2}=0{,}02$. Определить коэффициент усиления усилителя, если коэффициенты усиления

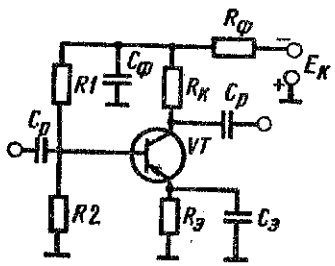

Рис. 18.7

второго и третьего каскадов соответственно равны $K_2=20$, $K_3=15$.

Решение. Согласно (18.15), коэффициент усиления первого каскада с учетом действия отрицательной обратной связи

$$K^*_1=K_1/(1+K_{ос}K_1)=20/(1+0{,}01\cdot 20)=16{,}7.$$

Общий коэффициент усиления второго и третьего каскадов с учетом действия отрицательной обратной связи

$$K^*_{2-3}=K_2K_3/(1+K_{ос2}K_2K_3)=$$
$$=20\cdot 15/(1+0{,}020\cdot 20\cdot 15)=42{,}9.$$

Коэффициент усиления усилителя

$$K^*=K^*_1K^*_{2-3}=16{,}7\cdot 42{,}9=716{,}4.$$

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

18.7. Коэффициент усиления усилительного каскада $K=50$. Переведите это значение в децибелы.

18.8. Известно, что усиление по напряжению трехкаскадного усилителя равно 1000. Определить усиление второго каскада, если усиление первого каскада составляет 25 дБ, а третьего — 10 дБ.

18.9. В трехкаскадном усилителе усиление каждого каскада составляет 30, 20 и 10 дБ. Определить общее усиление усилителя.

18.10. Коэффициенты усиления отдельных каскадов усилителя составляют 20, 30 и 10. Определить общий коэффициент усиления усилителя. Перевести полученный результат в децибелы.

18.11. На входе усилителя имеется сигнал с напряжением $U=5$ мВ. Определить напряжение на выходе усилителя, если его коэффициент усиления $K_U=60$ дБ.

18.12. Определить коэффициент усиления усилителя по мощности K_P, если его коэффициент усиления по напряжению $K_0=20$ дБ, а по току $K_I=10$.

18.13. Коэффициент усиления по мощности усилителя $K_P=250$. Определить коэффициент усиления по напряжению K_0, если коэффициент усиления по току $K_I=28$ дБ.

18.14. Напряжение на входе усилителя $U_{вх}=20$ мВ. Определить мощность на выходе усилителя, если его сопротивление нагрузки $R_н=25$ Ом, а коэффициент усиления по напряжению $K_0=25$.

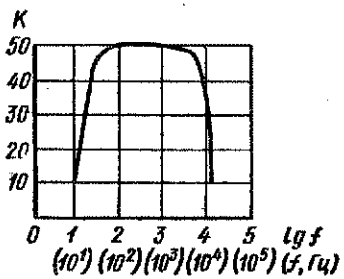

Рис. 18.8

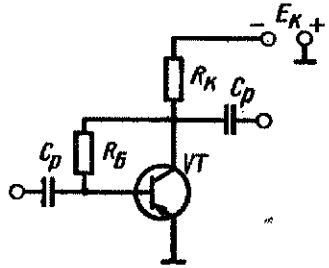

Рис. 18.9

18.15. В трехкаскадном усилителе коэффициенты усиления каскадов $K_1=10$, $K_2=15$ дБ, $K_3=5$. Определить коэффициенты усиления усилителя.

18.16. На выходе двухкаскадного усилителя имеется напряжение $U=2$ В. Определить напряжение на входе каждого каскада, если усиление первого каскада $K_1=40$ дБ, а второго $K_2=20$ дБ.

18.17. На рис. 18.8 представлена частотная характеристика усилителя. Определить граничные частоты полосы пропускания при коэффициентах частотных искажений $M_н=M_в=3$ дБ.

18.18. В трехкаскадном усилителе коэффициент усиления $K=300$. Определить коэффициент усиления второго каскада, если известны $K_1=20$ дБ и $K_3=6$.

18.19. В двухкаскадном усилителе коэффициент частотных искажений каскадов $M_{н1}=1{,}3$ дБ и $M_{н2}=2{,}5$ дБ. Определить коэффициент частотных искажений усилителя (рис. 18.9).

18.20. Напряжение на входе усилителя $U_{вх}=6$ мВ, коэффициент усиления на средних частотах $K_0=1000$. Определить выходное напряжение на нижней граничной частоте $U_{вых.н}$, если известно, что коэффициент частотных искажений $M_н=1{,}2$.

18.21. Коэффициент частотных искажений двухкаскадного усилителя на верхней граничной частоте $M_в=3$ дБ. Определить напряжение на выходе первого каскада на верхней граничной частоте $U_{вых.в}$, если напряжение на входе на всех частотах $U_{вх}=0{,}2$ В, коэффициент усиления первого каскада на средних частотах $K_{01}=15$, а коэффициент частотных искажений второго каскада $M_{в2}=1{,}8$ дБ.

18.22. Коэффициент усиления усилителя на средних частотах $K_0=80$. Определить коэффициент частотных искажений на нижней и верхней граничных частотах, на которых коэффициенты усиления соответственно $K_в=65$ и $K_в=55$.

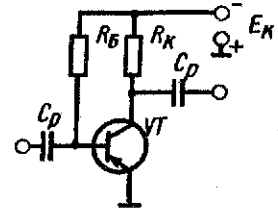

Рис. 18.10

18.23. На верхней и нижней граничных частотах коэффициенты усиления усилителя $K_в=30$ дБ и $K_н=28$ дБ. Определить коэффициенты частотных искажений $M_в$ и $M_н$, если коэффициент усиления усилителя на средних частотах $K_0=35$.

18.24. Определить коэффициент частотных искажений на верхней граничной частоте, если коэффициент усиления на нижней граничной частоте $K_н=90$ при коэффициенте частотных искажений $M_н=1{,}33$, а коэффициент усиления на верхней граничной частоте $K_в=95$.

18.25. Транзистор ГТ308А включен в схему рис. 18.10. Пользуясь семейством выходных характеристик транзистора (см. рис. 18.5), определить положение рабочей точки, если напряжение коллекторного питания $E_К=10$ В, а сопротивления резисторов $R_К=330$ Ом, $R_Б=24$ кОм.

18.26. Для усилительного каскада на транзисторе ГТ308А (рис. 18.10) определить сопротивления резисторов $R_Б$ и $R_К$, необходимые для обеспечения в рабочей точке коллекторного тока $I_{К0}=20$ мА при токе базы $I_{Б0}=0{,}6$ мА, если напряжение источника коллекторного питания $E_К=12$ В.

18.27. Используя входные и выходные характеристики транзистора ГТ308А (см. рис. 18.5) для схемы рис. 18.3, определить положение рабочей точки A, если известно, что $U_Б=0{,}32$ В, $R_Б=240$ Ом, $E_К=12$ В.

18.28. В схеме рис. 18.10 смещение задается фиксированным током базы. Используя входную характеристику транзистора ГТ308А (см. рис. 18.5), определить сопротивление резистора $R_Б$, если необходимо обеспечить напряжение на базе $U_Б=0{,}37$ В, а напряжение источника коллекторного питания $E_К=12$ В.

18.29. В схеме рис. 18.10 смещение задается фиксированным током базы. Рассчитать сопротивление резистора $R_Б$, если известно, что ток базы $I_{Б0}=250$ мкА, а напряжение $E_К=10$ В.

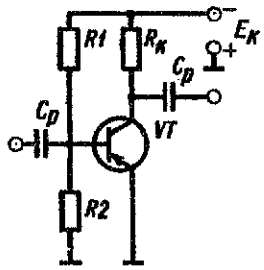

Рис. 18.11

18.30. Как выбирают сопротивление $R_Б$ резистора (рис. 18.10) для обеспечения смещения фиксированным током базы?

18.31. Как выбирают элементы делителя напряжения $R1$, $R2$ (рис. 18.11) для обеспечения смещения фиксированным напряжением на базе?

18.32. Для схемы рис. 18.11 определить сопротивления резисторов $R1$, $R2$, если известно, что $E_К = 10$ В, а $U_Б = 0{,}5$ В и $I_{Б0} = 25$ мкА.

18.33. Для схемы рис. 18.11 определить напряжение на базе, если известно, что $R2 = 500$ Ом, $R1 = 20$ кОм, $I_{Б0} = 30$ мкА, $E_К = 9$ В.

18.34. В усилителе (рис. 18.11) смещение задается фиксированным напряжением на базе. Определить положение рабочей точки на характеристиках транзистора ГТ308А (см. рис. 18.5), если известно, что $E_К = 10$ В, $R_К = 200$ Ом, $I_{дел} = 4{,}8$ мА, $R2 = 75$ Ом.

18.35. Для схемы рис. 18.11 известно положение рабочей точки A на выходных характеристиках транзистора ГТ308А: $I_{К0} = 20$ мА, $U_К = 4$ В. Определить положение рабочей точки A на входных характеристиках транзистора.

18.36. Определить напряжение смещения $E_с$, образующееся за счет катодного тока в пентодном усилительном каскаде, если ток анода $I_{а0} = 10$ мА, ток экранной сетки $I_{с20} = 2{,}5$ мА, сопротивление резистора в цепи катода $R_К = 360$ Ом.

18.37. Для схемы усилительного каскада (см. рис. 18.3) определить напряжение $U_Б$, если известно, что $E_К = 9$ В, $R1 = 9$ кОм, $R2 = 3$ кОм, $R_Э = 510$ Ом, $I_{Б0} = 100$ мкА, $I_{Э0} = 3$ мА.

18.38. Для схемы усилительного каскада (рис. 18.11) известно, что $E_К = 10$ В, $R1 = 68$ кОм, $R2 = 3{,}6$ кОм, $I_{Б0} = 40$ мкА. Проанализировать, обеспечивается ли необходимое напряжение смещения $U_Б = 0{,}5$ В.

18.39. Используя анодные характеристики лампового триода 6С34А (рис. 18.12), построить динамическую характеристику в анодных координатах при анодной нагрузке $R_а = 18$ кОм и напряжении анодного питания $E_а = 180$ В. На построенной характеристике

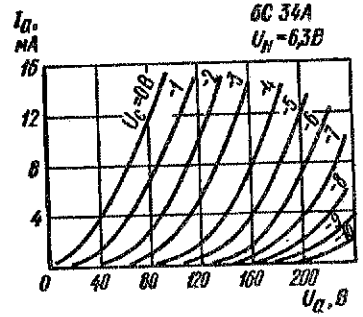

Рис. 18.12

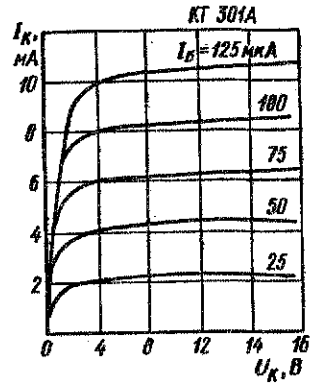

Рис. 18.13

найти положение рабочей точки A, соответствующее напряжению на управляющей сетке $U_с = -4$ В.

18.40. Используя динамическую характеристику, построенную в задаче 18.39, построить динамическую характеристику в анодно-сеточных координатах. На полученной характеристике определить положение рабочей точки, соответствующее напряжению на управляющей сетке $U_с = -4$ В.

18.41. Определить пределы изменения анодного тока в ламповом триоде 6С34А (рис. 18.12) при изменении напряжения на управляющей сетке от -8 до -2 В, если сопротивление анодной нагрузки $R_а = 18$ кОм, а напряжение источника анодного питания $E_а = 180$ В.

18.42. Используя выходные характеристики транзистора КТ301А (рис. 18.13), провести нагрузочную прямую через рабочую точку A ($I_{К0} = 2{,}1$ мА, $U_К = 12$ В) при сопротивлении коллекторной нагрузки $R_К = 1$ кОм.

18.43. Определить изменение тока коллектора транзистора КТ301А (рис. 18.13) в динамическом режиме при изменении напряжения на коллекторе от 16 до 4 В, если напряжение питания коллектора $E_К = 20$ В, а коллекторная нагрузка $R_К = 3{,}6$ кОм.

18.44. Используя нагрузочную прямую, построенную для задачи 18.42, определить положение рабочей точки, если входной ток изменяется по гармоническому закону в пределах $I_{Б\min} = 50$ мкА, $I_{Б\max} = 100$ мкА.

18.45. Определить коэффициент усиления усилителя на пентоде, у которого внутренние параметры

$R_i = 500$ кОм, $\mu = 2000$, а сопротивление анодной нагрузки $R_a = 47$ кОм.

18.46. Коэффициент усиления усилительного каскада на пентоде $K_0 = 150$. Найти сопротивление нагрузки R_a, если внутренние параметры пентода $\mu = 1500$, $R_i = 300$ кОм.

18.47. Для усилителя на ламповом триоде определить коэффициент усиления, если параметры триода $S = 8$ мСм, $R_i = 5$ кОм, а сопротивление анодной нагрузки $R_a = 15$ кОм.

18.48. Определить внутреннее сопротивление лампового триода, входящего в состав усилителя, если коэффициент усиления усилителя $K_0 = 40$, крутизна характеристики $S = 6$ мСм, сопротивление анодной нагрузки $R_a = 33$ кОм.

18.49. Коэффициент усиления лампового усилительного каскада на триоде $K_0 = 55$. Найти крутизну лампового триода, если его внутреннее сопротивление $R_i = 6$ кОм, а сопротивление анодной нагрузки $R_a = 20$ кОм.

18.50. Определить коэффициент усиления по напряжению транзисторного каскада УНЧ (см. рис. 18.8), если входное сопротивление каскада $R_{вх} = 510$ Ом, статический коэффициент усиления тока базы $h_{21Э} = 30$, сопротивление в цепи коллектора $R_К = 5{,}1$ кОм, а сопротивление нагрузки $R_н = 500$ Ом.

18.51. В транзисторном усилительном каскаде коэффициент усиления $K_U = 35$. Определить статический коэффициент усиления по току базы $h_{21Э}$, если входное сопротивление каскада $R_{вх} = 450$ Ом, а сопротивление нагрузки $R_н = 370$ Ом.

18.52. Используя выходные характеристики транзистора КТ301А (рис. 18.13), определить положения рабочей точки на нагрузочной прямой (при коллекторной нагрузке $R_К = 5{,}1$ кОм и напряжении коллекторного питания $E_К = 20$ В), соответствующие режимам классов А и АВ, если входной ток изменяется по гармоническому закону $I_{Бm} = 25$ мкА.

18.53. Определить мощность в нагрузке усилителя мощности (см. рис. 18.4), если КПД усилителя $\eta = 0{,}4$, мощность, потребляемая от источника питания, $P_0 = 1$ Вт, а КПД выходного трансформатора $\eta_т = 0{,}75$.

18.54. Определить мощность, потребляемую от источника питания P_0 в усилителе мощности (см. рис. 18.4), если КПД усилителя $\eta = 0{,}45$, мощность в нагрузке $P_н = 2$ Вт, а КПД выходного трансформатора $\eta_т = 0{,}8$.

18.55. Найти приведенное сопротивление нагрузки для однотактного усилителя мощности (см. рис. 18.4), если коэффициент трансформации трансформатора $n = 0{,}1$, а сопротивление нагрузки $R_н = 4$ Ом.

18.56. В однотактном усилителе мощности (см. рис. 18.4) сопротивление нагрузки переменному току, пересчитанное в первичную обмотку трансформатора, $R'_н = 470$ Ом. Определить коэффициент трансформации трансформатора, если сопротивление нагрузки $R_н = 3$ Ом.

18.57. Коэффициент усиления каскада $K_0 = 50$. Как изменится усиление при введении отрицательной обратной связи $K_{ос} = 0{,}02$?

18.58. После введения отрицательной обратной связи коэффициент усиления усилителя уменьшился со 150 до 100. Определить коэффициент обратной связи.

18.59. На каких частотах спектра (низших, средних, высших) усиление усилителя изменяется в большей степени при введении отрицательной обратной связи?

18.60. Двухкаскадный усилитель, имеющий коэффициенты усиления отдельных каскадов $K_1 = 20$ и $K_2 = 15$, охвачен отрицательной обратной связью. Определить усиление усилителя, если коэффициент отрицательной обратной связи $K_{ос} = 0{,}01$.

18.61. В двухкаскадном усилителе после введения отрицательной обратной связи с коэффициентом $K_{ос} = 0{,}01$ усиление уменьшилось до $K^* = 80$. Найти коэффициент усиления первого каскада без влияния отрицательной обратной связи, если коэффициент усиления второго каскада до введения отрицательной обратной связи составлял $K = 20$.

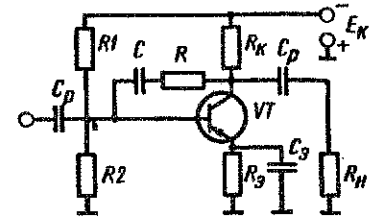

Рис. 18.14

18.62. На рис. 18.14 приведена схема усили-

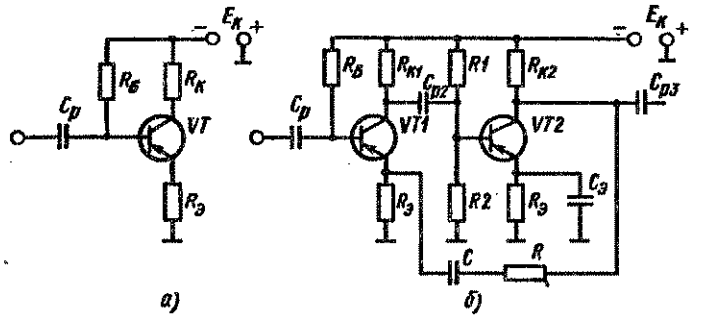

Рис. 18.15

теля, охваченного цепью отрицательной обратной связи. Как определить коэффициент обратной связи? Объясните назначение и выбор емкости конденсатора C.

18.63. На рис. 18.15, *а*, *б* приведены схемы усилителей с отрицательной обратной связью. Определить элементы отрицательной обратной связи. Как выбирают их значения? Как подается напряжение отрицательной обратной связи на вход усилительных элементов в обеих схемах?

18.64. Два усилителя с разными коэффициентами усиления охвачены отрицательной обратной связью с одинаковым коэффициентом обратной связи. В каком усилителе коэффициент нелинейных искажений уменьшится в большей степени?

18.65. Из каких соотношений необходимо выбирать емкость конденсатора C в схеме рис. 18.14, чтобы коэффициент отрицательной обратной связи был одинаковым для всех частот спектра входного сигнала?

18.66. Определить добротность параллельного контура Q, если его волновое сопротивление $Z_в = 5$ кОм, а сопротивление потерь $r_к = 50$ Ом.

КАЧЕСТВЕННЫЕ ЗАДАЧИ

18.67. Изобразите частотную характеристику усилительного каскада. Какие элементы схемы усилительного каскада влияют на вид частотной характеристики?

18.68. На рис. 18.7 изображена частотиая характеристика транзисторного усилительного каскада. Как изменится характеристика при обрыве конденсатора в цепи эмиттера?

18.69. Как выбирают усилительный элемент для усилительного каскада?

18.70. Какие из перечисленных транзисторов можно применять в усилителях напряжения низкой частоты ГТ108, МП42, ГТ310, КП101, П306?

18.71. Какие из перечисленных электронных ламп можно применять в усилителях напряжения низкой частоты 6С3П, 6Н17Б, 6С35А, 6Н28Б, 6Н3П?

18.72. На рис. 18.8 изображена схема каскада усилителя напряжения низкой частоты. Каково назначение элементов схемы?

18.73. Какие элементы схемы каскада усилителя напряжения низкой частоты (см. рис. 18.8) влияют на прохождение низкочастотных составляющих спектра частот входного сигнала?

18.74. Что произойдет со схемой каскада усилителя напряжения низкой частоты (см. рис. 18.8), если конденсатор $C_р$ закоротить?

18.75. Будет ли работать схема рис. 18.8, если радиомонтажник не запаяет в нее резистор $R_э$?

18.76. По какому признаку можно обнаружить обрыв резистора $R_э$?

18.77. Изменится ли режим транзистора по постоянному току в схеме рис. 18.8 в случае обрыва конденсатора $C_э$?

18.78. Какие схемы температурной стабилизации начального режима работы используют в усилительных каскадах?

18.79. Изобразите схему эмиттерной температурной стабилизации начального режима при включении транзистора с общей базой. Каково назначение элементов схемы?

18.80. Как выбирают элементы делителя напряжения, входящего в схему эмиттерной температурной стабилизации начального режима?

18.81. Изобразите схему коллекторной температурной стабилизации начального режима для транзистора, включенного с общим эмиттером.

18.82. Можно ли в схеме коллекторной температурной стабилизации устранить обратную связь по переменной составляющей? Изобразите соответствующую схему.

18.83. Как работает схема коллекторной температурной стабилизации (см. рис. 18.9) при увеличении температуры окружающей среды?

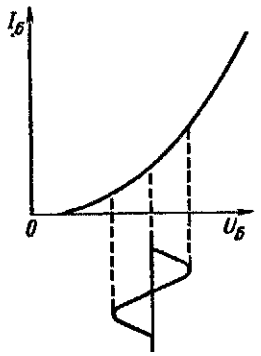

Рис. 18.16

18.84. Как работает схема эмиттерной температурной стабилизации (см. рис. 18.3) при уменьшении температуры окружающей среды?

18.85. Перечислить элементы, входящие в состав усилительного каскада.

18.86. При каком способе включения усилительного элемента можно обеспечить наибольшее усиление мощности в усилительном каскаде?

18.87. Какие элементы усилительного каскада (см. рис. 18.3) определяют его режим работы по постоянному току?

18.88. Изобразите схему для снятия динамических характеристик электронной лампы.

18.89. Почему динамическая характеристика электронной лампы в анодных координатах представляет собой прямую линию (нагрузочная прямая), а в анодно-сеточных координатах — кривую?

18.90. Как изменяется крутизна анодно-сеточной характеристики электронной лампы при включении в анодную цепь резистора?

18.91. Дайте определение угла отсечки выходного тока. Как угол отсечки влияет на режим работы усилителя?

18.92. Можно ли определить режим работы усилителя, пользуясь выходными характеристиками усилительного элемента?

18.93. Можно ли определить режим работы усилителя, пользуясь входными характеристиками усилительного элемента?

18.94. На рис. 18.16 представлена входная характеристика транзистора. В режиме какого класса работает усилитель? Режимы каких классов можно обеспечить путем изменения напряжения смещения транзистора?

18.95. В режиме какого класса можно обеспечить наибольшую мощность выходного сигнала?

18.96. Какие схемы междукаскадных связей вам известны?

18.97. В каких случаях между усилительными каскадами ставят трансформатор? Каково его назначение?

18.98. В режиме какого класса работает однотактный усилитель мощности низкой частоты?

18.99. Каковы особенности работы двухтактного усилителя мощности низкой частоты?

18.100. Всегда ли перед двухтактным усилителем мощности низкой частоты ставят фазоинверсную схему?

18.101. Изобразите простейший усилитель мощности низкой частоты с трансформаторным выходом. Назовите назначение его элементов.

18.102. В режиме какого класса обеспечиваются наименьшие нелинейные искажения в усилителе?

18.103. В режиме какого класса можно получить большую мощность при высоком КПД?

18.104. Сравните основные показатели усилителей напряжения и мощности.

18.105. Каково предельное значение КПД усилителя мощности в режиме класса А? Чем оно ограничено?

18.106. По какой причине однотактные усилители мощности работают в режиме класса А?

18.107. При каких углах отсечки коллекторного тока могут работать усилительные элементы в двухтактном усилителе мощности низкой частоты?

18.108. При работе с какими усилительными элементами (лампа, биполярный транзистор) можно обеспечить в усилителе мощности низкой частоты больший КПД в режиме класса В?

18.109. Какие параметры трансформатора влияют на прохождение через выходной каскад различных составляющих частотного спектра?

18.110. Дайте сравнительную оценку работы однотактных и двухтактных усилителей низкой частоты.

18.111. Как выбирают напряжение смещения в усилительных элементах двухтактного усилителя мощности низкой частоты?

18.112. Усилитель низкой частоты охвачен отрицательной обратной связью. Как изменится при этом коэффициент усиления усилителя?

18.113. Как влияет отрицательная обратная связь на частотные свойства усилителя?

18.114. Влияет ли отрицательная обратная связь на нелинейные искажения в усилителе?

18.115. Как изменяется управляющий сигнал на входе усилительного элемента при введении отрицательной обратной связи?

18.116. По какому признаку различают схемы отрицательной обратной связи?

18.117. При настройке усилителя выяснилось, что он охвачен положительной обратной связью. По какому признаку это можно определить?

18.118. При каких условиях в усилителе может иметь место частотно-независимая отрицательная обратная связь?

18.119. На какие параметры усилителя влияет отрицательная обратная связь?

18.120. Изобразите усилительный каскад, в котором действует последовательная отрицательная обратная связь по напряжению, при этом коэффициент обратной связи $K_{oc}=1$. Как называют такую схему?

18.121. Почему в эмиттерном повторителе коэффициент передачи напряжения меньше единицы?

18.122. Расскажите об особенностях повторителей. Каковы их входные и выходные сопротивления? Назовите область применения повторителей.

18.123. Сравните основные показатели усилителя низкой частоты и импульсного усилителя.

18.124. Как выбирают усилительные элементы в импульсных усилителях?

18.125. Влияет ли полярность импульсных сигналов на выбор положения рабочей точки в усилительных элементах импульсного усилителя?

18.126. По каким схемам выполняют импульсные усилители?

18.127. По каким схемам выполняют оконечные каскады импульсных усилителей?

18.128. Изобразите частотную характеристику усилителя постоянного тока. Каковы ее особенности?

18.129. На рис. 18.17 изображена схема усилителя постоянного тока с гальванической связью между каскадами. Каковы особенности схемы? Как выбирают элементы схемы?

18.130. Расскажите об основных причинах, вызывающих «дрейф нуля» в усилителях постоянного тока.

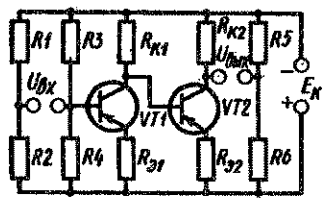

Рис. 18.17

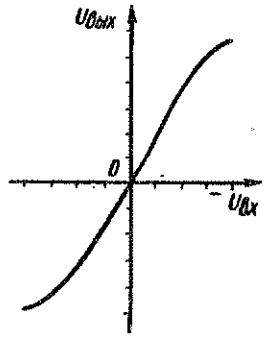

Рис. 18.18

18.131. Изобразите схему балансного усилителя постоянного тока на транзисторах с эмиттерной связью и объясните назначение всех элементов схемы.

18.132. На рис. 18.18 изображена амплитудная характеристика усилителя постоянного тока. Какой схеме УПТ она соответствует?

18.133. В каких устройствах применяют избирательные усилители?

18.134. Что используют в качестве нагрузки в избирательных усилителях?

18.135. От каких параметров зависит избирательность параллельного колебательного контура?

Глава 19

ЭЛЕКТРОННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ И УРАВНЕНИЯ

Частота колебаний автогенератора *LC*-типа (рис. 19.1)

$$f_0=1/(2\pi\sqrt{L_К C_К}), \qquad (19.1)$$

где $L_К$, $C_К$ — индуктивность и емкость колебательного контура.

Частота колебаний автогенератора *RC*-типа (рис. 19.2)

$$f_0=1/(2\pi\sqrt{6}RC), \qquad (19.2)$$

где RC — параметры цепи обратной связи.

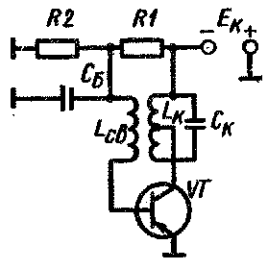

Рис. 19.1

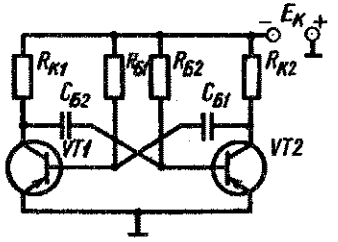

Рис. 19.3

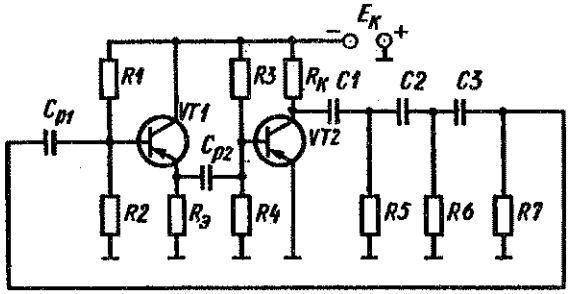

Рис. 19.2

Период колебаний транзисторного мультивибратора (рис. 19.3)

$$T = 0{,}7\left(C_{Б1}R_{Б1} + C_{Б2}R_{Б2}\right), \qquad (19.3)$$

где $C_{Б1}$, $C_{Б2}$ — емкости конденсаторов в цепях базы транзисторов; $R_{Б1}$, $R_{Б2}$ — сопротивления резисторов в цепях базы транзисторов.

Скважность импульсных сигналов (рис. 19.4)

$$Q = T/\tau_и, \qquad (19.4)$$

где T — период импульсных сигналов; $\tau_и$ — длительность импульсов.

Добротность колебательного контура

$$Q = Z_в/r_К, \qquad (19.5)$$

где $Z_в = \sqrt{L_К/C_К}$ — волновое (характеристическое) сопротивление контура; $r_К$ — сопротивление потерь контура.

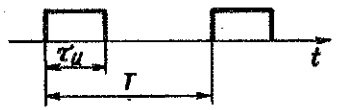

Рис. 19.4

Резонансное сопротивление параллельного колебательного контура

$$Z_К = QZ_в. \qquad (19.6)$$

19.1. В схеме автогенератора гармонических колебаний с емкостной обратной связью (рис. 19.5) частота генерируемых колебаний $f_0 = 2$ МГц. Определить индуктивность контура $L_К$, если известно, что $C1 = 430$ пФ, $C2 = 1000$ пФ.

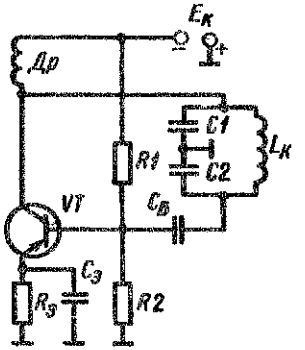

Рис. 19.5

Решение. Согласно (19.1), частота колебаний автогенератора

$$f_0 = 1/\left(2\pi\sqrt{L_К C_{общ}}\right),$$

где $C_{общ} = C1C2/(C1 + C2) = 430 \times 1000/(430 + 1000) = 300$ пФ. Индуктивность контура

$$L_К = 1/\left(4\pi^2 f_0^2 C_{общ}\right) = 1/\left[4 \cdot 3{,}14^2 \left(2 \cdot 10^6\right)^2 \cdot 300 \times 10^{-12}\right] = 21 \text{ мкГн}.$$

19.2. Для схемы автогенератора гармонических колебаний с емкостной обратной связью (рис. 19.5) определить частоту генерируемых колебаний f_0, если резонансное сопротивление контура $Z_К = 20$ кОм, сопротивление потерь в контуре $r_К = 20$ Ом, а контурные емкости $C1 = C2 = 410$ пФ.

Решение. Согласно (19.6), резонансное сопротивление контура $Z_К = QZ_в = Z_в^2/r_К$, откуда волновое сопротивление контура

$$Z_в = \sqrt{Z_К r_К} = \sqrt{20 \cdot 10^3 \cdot 20} = 632 \text{ Ом},$$

где $C_{общ} = C1C2/(C1 + C2) = 0{,}5C1 = 205$ пФ. Частота генерируемых колебаний

$$f_0 = 1/2\pi C_{общ} Z_в = 1/\left(2 \cdot 3{,}14 \cdot 205 \cdot 10^{-12} \cdot 632\right) = 1{,}2 \text{ МГц}.$$

19.3. Для схемы транзисторного мультивибратора (см. рис. 19.3) определить длительность паузы между импульсами τ_2, если известно, что $R_{Б1} = 10$ кОм, $C_{Б1} = 0{,}01$ мкФ, скважность импульсов $Q = 20$.

Решение. Согласно (19.4), скважность импульсов

$$Q = T/\tau_и = \left(\tau_1 + \tau_2\right)/\tau_1,$$

откуда длительность паузы

$$\tau_2 = \tau_1\left(Q - 1\right) = 0{,}7R_{Б1}C_{Б1}\left(Q - 1\right) = 0{,}7 \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 0{,}01 \times 10^{-6}\left(20 - 1\right) = 1{,}33 \text{ мс}.$$

19.4. На горизонтально отклоняющие пластины подается пилообразное напряжение с амплитудой $U_{mг}=200$ В. На вертикально отклоняющие пластины подается пилообразное напряжение с такой же частотой повторения, но с амплитудой $U_{mг}=250$ В. Какая фигура образуется на экране электронно-лучевой трубки? Определите ее длину и угловое положение относительно горизонтальной оси, если чувствительность горизонтально отклоняющих пластин $h_г=0{,}2$ мм/В, а вертикально отклоняющих $h_в=0{,}3$ мм/В.

Решение. Под действием пилообразного напряжения, поданного на горизонтально отклоняющие пластины, электронный луч прочерчивает горизонтальную прямую длиной $l_в=h_г U_{mг}=0{,}2\cdot 200=40$ мм. Под действием пилообразного напряжения, поданного на вертикально отклоняющие пластины, электронный луч прочерчивает вертикальную прямую длиной $l_в=h_в U_{mв}=0{,}3\cdot 250=75$ мм. В результате совместного действия напряжений, поданных на обе пары отклоняющих пластин, электронный луч смещается на экранах по прямой линии на расстояние $l=\sqrt{l_г^2+l_в^2}=$ $=\sqrt{40^2+75^2}=85$ мм.

Угловое положение линии относительно горизонтальной оси

$$\varphi=\operatorname{arctg}(l_в/l_г)=\operatorname{arctg}(75/40)=62°.$$

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

19.5. Для схемы автогенератора гармонических колебаний (см. рис. 19.1) определить частоту колебаний, если параметры колебательного контура $L_К=$ $=600$ мкГн, $C_К=1000$ пФ.

19.6. Для схемы автогенератора гармонических колебаний (см. рис. 19.1) определить коэффициент передачи цепи обратной связи $K_{ос}$, если известно, что $L_К=100$ мкГн, $L_и=50$ мкГн, коэффициент связи между катушками $K_{св}=0{,}6$.

19.7. Для схемы автогенератора гармонических колебаний с емкостной связью (рис. 19.5) определить частоту колебаний, если параметры контура $C1=1300$ пФ, $C2=750$ пФ, $L_К=150$ мкГн.

19.8. Для схемы автогенератора гармонических колебаний с емкостной обратной связью (рис. 19.5)

определить контурные емкости $C1$ и $C2$, если частота генерируемых колебаний $f_0=3$ МГц, индуктивность контура $L_К=30$ мкГн, а $C1=2C2$.

19.9. Для схемы транзисторного мультивибратора (см. рис. 19.3) определить полный период колебаний, если $R_{Б1}=R_{Б2}=20$ кОм, $C_{Б1}=C_{Б2}=0{,}1$ мкФ.

19.10. Для схемы транзисторного мультивибратора (см. рис. 19.3) определить полный период колебаний, если $R_{Б1}=15$ кОм, $R_{Б2}=24$ кОм, $C_{Б1}=0{,}05$ мкФ, $C_{Б2}=0{,}1$ мкФ.

19.11. Определить частоту следования импульсов в транзисторном мультивибраторе (см. рис. 19.3), если $R_{Б1}=15$ кОм, $R_{Б2}=6{,}8$ кОм, $C_{Б1}=4700$ пФ, $C_{Б2}=0{,}05$ мкФ.

19.12. Для схемы транзисторного мультивибратора (см. рис. 19.3) определить сопротивление резистора $R_{Б1}$, если частота следования импульсов $f_с=2$ кГц, $R_{Б2}=3{,}9$ кОм, $C_{Б2}=0{,}015$ мкФ, $C_{Б1}=0{,}01$ мкФ.

19.13. Определить длительность импульса для схемы транзисторного мультивибратора (см. рис. 19.3), если $R_{Б2}=18$ кОм, $C_{Б2}=0{,}02$ мкФ, $Q=15$.

19.14. Для схемы транзисторного мультивибратора (см. рис. 19.3) определить параметры $R_{Б2}$, $C_{Б2}$, если $R_{Б1}=16$ кОм, $C_{Б1}=0{,}015$ мкФ, $Q=2$.

19.15. Для схемы одновибратора (см. рис. 19.7) определить длительность импульса, если $R_Б=15$ кОм, $C_Б=0{,}01$ мкФ.

19.16. На горизонтально отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки подано синусоидальное напряжение с амплитудой $U_m=150$ В. При этом на экране образуется линия длиной $l=45$ мм. Определить чувствительность горизонтально отклоняющих пластин.

19.17. На экране электронно-лучевой трубки просматривается вертикальная линия длиной $l=50$ мм. После подачи прежнего синусоидального напряжения на другую пару отклоняющих пластин длина просматриваемой горизонтальной линии уменьшилась на 10 мм. Почему это возможно? На какую пару отклоняющих пластин первоначально подавалось напряжение?

19.18. На обе пары отклоняющих пластин подано одинаковое постоянное напряжение $U=200$ В. Чувствительность вертикально отклоняющих пластин

$h_в = 0{,}2$ мм/В, горизонтально отклоняющих $h_г = 0{,}15$ мм/В. Определить удаление светящейся точки от центра экрана.

19.19. Построить фигуру, получающуюся на экране электронно-лучевой трубки, если на вертикально отклоняющие и горизонтально отклоняющие пластины подано напряжение $u = U_m \sin\Omega t$, а чувствительность обеих пар отклоняющих пластин одинакова.

19.20. Какая фигура получится на экране электронно-лучевой трубки, если на обе пары отклоняющих пластин подать одинаковое напряжение $u = U_m \sin\Omega t$, а чувствительность вертикально отклоняющих пластин в 1,5 раза больше, чем горизонтально отклоняющих?

19.21. На горизонтально отклоняющие пластины подано напряжение $u_1 = U_m \sin\Omega t$, на вертикально отклоняющие $-u_2 = U_m \sin 2\Omega t$. Построить получающуюся на экране электронно-лучевой трубки фигуру, если чувствительность обеих пар отклоняющих пластин одинакова.

19.22. На вертикально отклоняющие пластины подано напряжение $u_1 = U_m \sin\Omega t$, на горизонтально отклоняющие пластины $u_2 = U_m \sin 2\Omega t$. Построить получающуюся на экране электронно-лучевой трубки фигуру, если чувствительность отклоняющих пластин одинакова.

19.23. На горизонтально отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки подано пилообразное напряжение, а на вертикально отклоняющие пластины — синусоидальное. Определить частоту следования импульсов пилообразного напряжения, если на экране электронно-лучевой трубки видны четыре периода синусоидального напряжения с частотой $f = 200$ Гц.

19.24. На горизонтально отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки подано напряжение синусоидальной формы с частотой $f = 1$ кГц. На вертикально отклоняющие пластины также подается напряжение синусоидальной формы. Определить частоту этого напряжения, если на экране просматривается фигура, показанная на рис. 19.6.

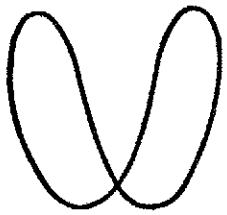

Рис. 19.6

19.25. На обе пары отклоняющих пластин электронно-лучевой трубки, имеющих одинаковую чувствительность, подаются гармонические колебания, и на экране образуется прямая с углом наклона относительно горизонтальной оси $\varphi = 135°$. Каковы частоты гармонических колебаний? В каких фазовых соотношениях находятся колебания относительно друг друга?

19.26. На обе пары отклоняющих пластин электронно-лучевой трубки, имеющих одинаковую чувствительность, подаются гармонические колебания одинаковой частоты, но сдвинутые по фазе относительно друг друга на 90°. Какая фигура просматривается на экране электронно-лучевой трубки?

КАЧЕСТВЕННЫЕ ЗАДАЧИ

19.27. Каков принцип работы автогенератора гармонических колебаний?

19.28. На рис. 19.1 изображена схема автогенератора гармонических колебаний с трансформаторной обратной связью. Каково назначение всех элементов схемы?

19.29. Изобразите автогенератор гармонических колебаний по схеме индуктивной трехточки (с автотрансформаторной обратной связью) и объясните назначение всех элементов схемы.

19.30. На рис. 19.5 приведена схема автогенератора гармонических колебаний с емкостной обратной связью (емкостная трехточка). Каково назначение всех элементов схемы?

19.31. В схеме автогенератора гармонических колебаний с транформаторной обратной связью (см. рис. 19.1) емкость конденсатора $C_к$ увеличена в два раза. Как изменится частота колебаний автогенератора?

19.32. Назовите основные причины нестабильности частоты автогенератора. Каким способом можно значительно увеличить стабильность частоты автогенераторов?

19.33. Расскажите об особенностях автогенераторов гармонических колебаний типа *RC*. На каких частотах они работают?

19.34. Почему в автогенераторах гармонических колебания *RC*-типа используются трехзвенные фазовращающие цепочки?

19.35. На рис. 19.2 приведена схема транзисторного автогенератора гармонических колебаний *RC*-типа. Каково назначение всех элементов схемы?

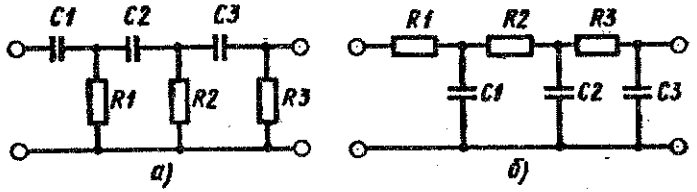

Рис. 19.7

19.36. На рис. 19.7, *а, б* представлены фазовращающие цепочки, входящие в состав автогенератора гармонических колебаний типа *RC*. Каковы частоты генерируемых гармонических колебаний, если элементы цепочек одинаковы?

19.37. Почему в генераторе гармонических колебаний *RC*-типа (см. рис. 19.2) генерируются колебания только одной частоты?

19.38. На рис. 19.3 приведена схема транзисторного мультивибратора. Изобразите временные диаграммы, поясняющие работу схемы.

19.39. Для схемы транзисторного мультивибратора (см. рис. 19.3) покажите цепи заряда и разряда конденсаторов.

19.40. На рис. 19.8 приведена схема одновибратора (мультивибратора с одним устойчивым состоянием). Изобразите временные диаграммы, поясняющие работу схемы.

19.41. Какой транзистор в исходном состоянии закрыт в схеме ждущего мультивибратора (рис. 19.8)?

19.42. Какой полярности должен быть входной сигнал, чтобы запустить схему мультивибратора (рис. 19.8)?

19.43. По какой цепи происходит разряд конденсатора $C_Б$ в ждущем мультивибраторе (рис. 19.8) после подачи на вход запускающего импульса?

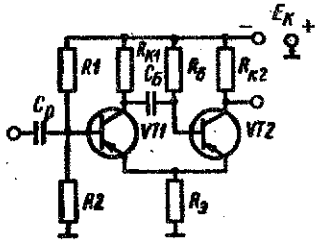

Рис. 19.8

19.44. До какого напряжения заряжен конденсатор $C_Б$ в схеме одновибратора (рис. 19.8) в ждущем режиме?

19.45. Расскажите о возможных областях применения мультивибраторов.

19.46. Дайте определение и классификацию триггеров.

19.47. На рис. 19.9 приведена схема триггера на транзисторах. Изобразите временные диаграммы, поясняющие принцип работы схемы.

19.48. Как можно увеличить быстродействие триггера?

19.49. Расскажите о способах запуска триггеров.

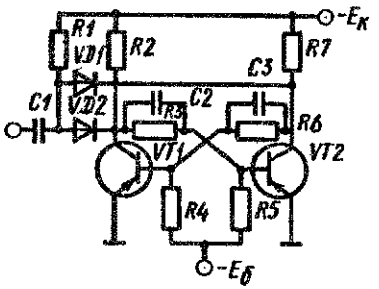

Рис. 19.9

19.50. Как связана частота выходных импульсов триггера с частотой запускающих импульсов?

19.51. Изобразите схему триггера на транзисторах, в которой запуск может осуществляться только импульсами чередующейся полярности. Приведите временные диаграммы, поясняющие принцип работы схемы.

19.52. Какого значения достигает амплитуда выходного напряжения у транзисторных триггеров?

19.53. Как происходит процесс перехода схемы триггера из одного устойчивого состояния в другое?

19.54. Объясните назначение диодов в схеме триггера (см. рис. 19.8).

19.55. На каких приборах (кроме электронных ламп и транзисторов) можно выполнять триггеры?

19.56. Расскажите о возможной области применения триггеров.

19.57. На рис. 19.10 приведена схема генератора пилообразного напряжения. Изобразите временную диаграмму, поясняющую принцип работы схемы, и по ней определите значение пилообразного напряжения.

19.58. Можно ли изменить пилообразное напряжение в генераторе на неоновой лампе?

19.59. Изобразите генератор пилообразного напряжения на тиратроне. Как в нем можно изменить значение пилообразного напряжения?

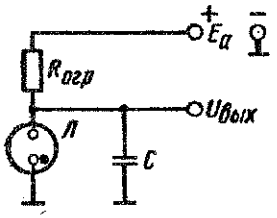

Рис. 19.10

19.60. Каким образом можно улучшить линейность пилообразного напряжения в генераторе на тиратроне?

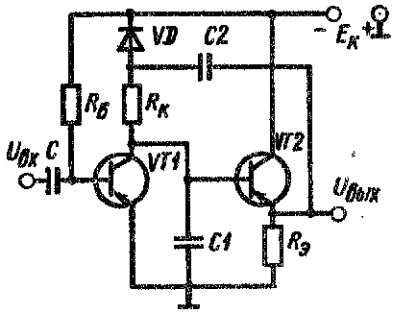

Рис. 19.11

19.61. Чем ограничивается верхний предел частоты тиратронного генератора пилообразного напряжения?

19.62. На рис. 19.11 приведена схема транзисторного генератора пилообразного напряжения. Изобразите временные диаграммы, поясняющие принцип работы схемы.

19.63. Каково назначение эмиттерного повторителя в схеме транзисторного генератора пилообразного напряжения (рис. 19.11)?

19.64. Как связана длительность рабочего хода в схеме генератора пилообразного напряжения (рис. 19.11) с параметрами запускающих импульсов?

19.65. До какого значения напряжения заряжается конденсатор $C1$ в схеме рис. 19.11?

19.66. Изобразите схему генератора пилообразного напряжения на пентоде. Каковы особенности работы схемы? Почему в ламповых схемах генераторов целесообразно использовать пентоды, а не триоды?

19.67. На рис. 19.12 приведена схема лампового генератора пилообразного напряжения. Объясните принцип работы схемы.

19.68. Какова полярность напряжения на защитной сетке пентода в схеме генератора пилообразного напряжения (рис. 19.12) в исходном режиме? Изобразите примерный вид запускающих импульсов.

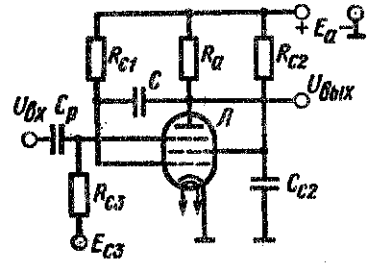

Рис. 19.12

19.69. Расскажите о возможных областях применения генераторов пилообразного напряжения.

19.70. Дайте классификацию электронных вольтметров по принципу их работы.

19.71. Можно ли с помощью электронного вольтметра измерять напряжения на участках цепи, сопротивление которых достигает нескольких мегаом?

19.72. Почему с помощью электронного вольтметра можно измерять напряжение в цепях с частотами до сотен мегагерц?

19.73. К каким цепям можно подключать электронный вольтметр с закрытым и открытым входами?

19.74. Как можно с помощью осциллографа измерить глубину модуляции амплитудно-модулированных колебаний?

Приложение 1

Диэлектрическая проницаемость и электрическая прочность ряда электроизоляционных материалов даны в табл. П.1.1.

Таблица П.1.1

Диэлектрик	$E_{пр}$, кВ/см	$E_{пр}$, кВ/см, среднее	ε	Диэлектрик	$E_{пр}$, кВ/см	$E_{пр}$, кВ/см, среднее	ε
Воздух	30	30	1	Плексиглас	—	—	3,3
Вода	—	—	81	Слюда	80—200	150	6,0
Керосин	—	—	2,1	Спирт	—	—	33
Масло минеральное	—	100	—	Стекло	100—400	300	7,0
Парафин	200	200	2,1	Трансформаторное масло	50—180	150	2,3
Бумага парафинированная	—	—	2,0	Электрокартон	90—140	120	5,0
				Эбонит	600—800	700	4,3
				Фарфор	150	150	5,5
				Янтарь	—	—	2,8

Удельное сопротивление металлов и сплавов и температурный коэффициент сопротивления даны в табл. П.1.2.

Таблица П.1.2

Материал	ρ, Ом·мм²/м	α, °C^{-1}	Материал	ρ, Ом·мм²/м	α_2, °C^{-1}
Алюминий	0,029	0,004	Платина	0,1	0,004
Вольфрам	0,056	0,005	Ртуть	0,958	0,0009
Константан	0,48	0,00004	Свинец	0,21	0,004
Латунь	0,071	0,002	Серебро	0,016	0,004
Медь	0,0175	0,004	Сталь	0,12	0,006
Нихром	1,1	0,0001	Фехраль	1,4	0,0002
Манганин	0,42	0,000006			

Приложение 2

Технические данные двигателей серии 2П мощностью 1,0—10 кВт даны в табл. П.2.1.

Таблица П.2.1

Тип двигателей	Номинальная мощность $P_{ном}$, кВт	Максимальная частота вращения ослаблением поля, об/мин, при номинальном напряжении, В				Маховой момент, кг·м²	Масса, кг
		110	220	340	440		
$n_{ном}$ = 3000 об/мин							
2ПБ100М	1,2	4000	4000	3600	—	0,011	36
2ПБ110М	1,4	4000	4000	4000	4000	0,014	47
2ПБ112L	2,0	4000	4000	5000	4000	0,017	56
2ПБ132М	4,5	4000	4000	4000	4000	0,0375	86
2ПБ160М	7,1	4000	4000	4000	4000	0,0835	147
2ПБ160L	8,1	—	4000	4000	4000	0,104	159
2ПО132М	5,5	4000	4000	4000	4000	0,0375	100
2ПО132L	6,7	4000	4000	4000	4000	0,0468	110
2ПО160М	9,5	4000	4000	4000	4000	0,0835	151
2ПН90М	1,0	4000	4000	3600	—	0,004	24
2ПН90L	1,3	4000	4000	3600	—	0,005	27
2ПН100L	2,2	4000	4000	3600	—	0,012	39
2ПН112М	3,6	4000	4000	4000	4000	0,014	47
2ПН112L	5,3	4000	4000	4000	4000	0,017	56
2ПФ132М	7,5	4000	4000	4000	4000	0,0375	98
$n_{ном}$ = 1500 об/мин							
2ПБ112L	1,0	4000	4000	3750	3750	0,068	56
2ПБ132М	2,4	4000	4000	3750	3750	0,15	86
2ПБ132L	3,2	4000	4000	3750	3750	0,187	96
2ПБ160М	4,2	4000	4000	3750	3750	0,334	141
2ПБ160L	5,3	4000	4000	3750	3750	0,416	159
2ПБ180М	7,1	3500	3500	3500	3500	0,8	213
2ПБ180L	8,5	3500	3500	3500	3500	0,916	234
2ПО160М	6,0	4000	4000	3750	3750	0,334	161
2ПО160L	7,1	4000	4000	3750	3750	0,416	169
2ПО180М	10,0	1500	3500	3500	3500	0,8	235
$n_{ном}$ = 1000 об/мин							
2ПН112L	1,25	4000	3500	2500	2500	0,068	56
2ПН132М	2,5	4000	3000	2500	2500	0,15	86
2ПН132L	3,0	4000	3000	2500	2500	0,187	96
2ПН160М	4,5	4000	3000	2500	2500	0,334	141
2ПН160L	6,3	4000	3000	2500	2500	0,416	159
2ПН180М	8,0	3500	3000	2500	2500	0,8	213

Продолжение табл. П. 2.1

Тип двигателей	Номинальная мощность $P_{ном}$, кВт	Максимальная частота вращения ослаблением поля, об/мин, при номинальном напряжении, В				Маховой момент, кг·м²	Масса, кг
		110	220	340	440		
$n_{ном}$ = 1000 об/мин							
2ПН180L	10,0	3500	3000	2500	2500	0,916	234
2ПБ132М	1,6	4000	3000	2500	2500	0,15	86
2ПБ132L	1,9	4000	3000	2500	2500	0.187	96
2ПБ160М	2,5	4000	3000	2500	2500	0,334	141
2ПБ160L	3,2	4000	3000	2500	2500	0,416	152
2ПБ180М	4,5	3500	3000	2500	2500	0,8	213
2ПБ180L	5,5	3500	3000	2500	2500	0,916	242
2ПО132L	2,2	4000	3000	2500	2500	0,187	110
2ПО160М	3,2	4000	3000	2500	2500	0,334	151
2ПО160L	4,0	4000	3000	2500	2500	0,418	169
2ПО180М	6,3	3500	3000	2500	2500	0,8	235
$n_{ном}$ = 750 об/мин							
2ПН132М	1,6	3000	2500	2000	1850	0,15	86
2ПН132L	1,9	3000	2500	2000	1850	0,187	96
2ПН160М	3,0	3000	2500	2000	1850	0,334	141
2ПН160L	4,0	3000	2500	2000	1850	0,416	159
2ПН180М	5,6	3000	2500	2000	1850	0,8	213
2ПО160L	3,2	3000	2500	2000	1850	0,416	169
2ПО180М	4,5	3000	2500	2000	1850	0,800	235
2ПН180L	7,1	3000	2500	2000	1850	0,916	234
2ПН180М	5,6	3000	2500	2000	1850	0,8	213
2ПН200М	8,5	3000	2500	2000	1850	1,0	282

Технические данные асинхронных двигателей основного исполнения с короткозамкнутым ротором серий АО2 и АОЛ2 мощностью до 20 кВт даны в табл. П.2.2.

Таблица П.2.2

Тип двигателя	$P_{ном}$, кВт	n, об/мин	η, %	cos φ	$M_п/M_{ном}$	$M_{max}/M_{ном}$	J, кг·м²
n = 3000 об/мин (синхронная)							
АО2-11-2	АОЛ2-11-2	0,8	2815	78,0	0,86	1,9	2,2	0,0008
АО2-12-2	АОЛ2-12-2	1,1	2815	79,5	0,87	1,9	2,2	0,0015
АО2-21-2	АОЛ2-21-2	1,5	2860	80,5	0,88	1,8	2,2	0,002
АО2-22-2	АОЛ2-22-2	2,2	2860	83,0	0,89	1,8	2,2	0,0033
АО2-31-2	АОЛ2-31-2	3,0	2880	84,5	0,89	1,7	2,2	0,007

Продолжение табл. П. 2.2

Тип двигателя	$P_{ном}$, кВт	n, об/мин	η, %	cos φ	$M_п/M_{ном}$	$M_{max}/M_{ном}$	J, кг·м²
n = 3000 об/мин (синхронная)							
АО2-32-2	АОЛ2-32-2	4,0	2880	85,5	0,89	1,7	2,2	0,01
АО2-41-2		5,5	2900	86,0	0,89	1,6	2,2	0,016
АО2-42-2		7,5	2910	87,0	0,89	1,6	2,2	0,025
АО2-51-2		10	2900	88,0	0,89	1,5	2,2	0,032
АО2-52-2		13	2900	88,0	0,89	1,5	2,2	0,045
АО2-62-2		17	2900	88,0	0,90	1,2	2,2	0,075
АО2-71-2		22	2900	88,0	0,90	1,1	2,2	0,1
n = 1500 об/мин (синхронная)							
АО2-11-4	АОЛ2-11-4	0,6	1360	72,0	0,76	1,8	2,2	0,001
АО2-12-4	АОЛ2-12-4	0,8	1360	74,5	0,78	1,8	2,2	0,0021
АО2-21-4	АОЛ2-21-4	1,1	1400	78,0	0,80	1,8	2,2	0,003
АО2-22-4	АОЛ2-22-4	1,5	1400	80,0	0,81	1,8	2,2	0,005
АО2-31-4	АОЛ2-31-4	2,2	1430	82,5	0,83	1,8	2,2	0,008
АО2-32-4	АОЛ2-32-4	3,0	1430	83,5	0,84	1,8	2,2	0,0125
АО2-41-4		4,0	1450	86,0	0,85	1,5	2,0	0,02
АО2-42-4		5,5	1450	87,0	0,86	1,5	2,0	0,03
АО2-51-4		7,5	1450	88,5	0,87	1,4	2,0	0,045
АО2-52-4		10	1450	88,5	0,87	1,4	2,0	0,07
АО2-61-4		13	1450	88,5	0,89	1,3	2,0	0,1
АО2-62-4		17	1450	89,0	0,89	1,3	2,0	0,137
n = 1000 об/мин (синхронная)							
АО2-11-6	АОЛ2-11-6	0,4	915	68,0	0,65	1,8	2,2	0,0014
АО2-12-6	АОЛ2-12-6	0,6	915	70,0	0,68	1,8	2,2	0,0022
АО2-21-6	АОЛ2-21-6	0,8	930	73,0	0,71	1,8	2,2	0,004
АО2-22-6	АОЛ2-22-6	1,1	930	76,0	0,73	1,8	2,2	0,006
АО2-31-6	АОЛ2-31-6	1,5	950	79,0	0,75	1,8	2,2	
АО2-32-6	АОЛ2-32-6	2,2	950	81,0	0,77	1,8	2,2	0,017
АО2-41-6		3,0	960	81,5	0,78	1,3	1,8	0,03
АО2-42-6		4,0	960	83,0	0,79	1,3	1,8	0,04
АО2-51-6		5,5	970	85,5	0,81	1,3	1,8	0,08
АО2-52-6		7,5	970	87,0	0,82	1,3	1,8	0,11
АО2-61-6		10	970	88,0	0,89	1,2	1,8	0,17
АО2-62-6		13	970	88,0	0,89	1,2	1,8	0,25
АО2-71-6		17	970	90,0	0,90	1,2	1,8	0,38
n = 750 об/мин (синхронная)							
АО2-41-8		2,2	720	79,5	0,69	1,2	1,7	0,025
АО2-42-8		3,0	720	80,0	0,70	1,2	1,7	0,049
АО2-51-8		4,0	725	84,0	0,71	1,2	1,7	0,072

Продолжение табл. П. 2.2

Тип двигателя	$P_{ном}$, кВт	n, об/мин	η, %	cos φ	$M_c/M_{ном}$	$M_{max}/M_{ном}$	$M_{min}/M_{ном}$	J, кг·м²
n=750 об/мин (синхронная)								
АО2-52-8	5,5	725	85,0	0,72	1,2	1,7		0,11
АО2-61-8	7,5	725	86,5	0,81	1,2	1,7		0,17
АО2-62-8	10	725	87,5	0,81	1,2	1,7		0,25
АО2-71-8	13	725	89,0	0,83	1,1	1,7		0,38
АО2-72-8	17	725	89,5	0,83	1,1	1,7		0,5
АО2-81-8	22	730	90,5	0,84	1,1	1,7		0,82

Технические данные асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором серии 4А основного исполнения (закрытые обдуваемые) даны в табл. П.2.3.

Таблица П.2.3

Тип двигателя	$P_{ном}$, кВт	При номинальной нагрузке			$\frac{M_{max}}{M_{ном}}$	$\frac{M_п}{M_{ном}}$	$\frac{M_{min}}{M_{ном}}$	$\frac{I_п}{I_{ном}}$	J, кг·м²
		n, об/мин	η, %	cos φ					
n=3000 об/мин (синхронная)									
4АА50А2У3	0,09	2740	60,0	0,70	2,2	2,0	1,8	4,0	$0{,}245\cdot10^{-4}$
4АА50В2У3	0,12	2710	63,0	0,70	2,2	2,0	1,8	4,0	$0{,}268\cdot10^{-4}$
4АА56А2У3	0,18	2800	66,0	0,76	2,2	2,0	1,5	4,0	$4{,}14\cdot10^{-4}$
4АА56В2У3	0,25	2770	68,0	0,77	2,2	2,0	1,5	4,0	$4{,}65\cdot10^{-4}$
4АА63А2У3	0,37	2750	70,0	0,86	2,2	2,0	1,5	4,5	$7{,}63\cdot10^{-4}$
4АА63В2У3	0,55	2740	73,0	0,86	2,2	2,0	1,5	4,5	$9\cdot10^{-4}$
4А71А2У3	0,75	2840	77,0	0,87	2,2	2,0	1,5	5,5	$9{,}75\cdot10^{-4}$
4А71В2У3	1,10	2810	77,5	0,87	2,2	2,0	1,5	5,5	$10{,}5\cdot10^{-4}$
4А80А2У3	1,50	2850	81,0	0,85	2,6	2,1	1,4	6,5	$18{,}3\cdot10^{-4}$
4А80В2У3	2,20	2850	83,0	0,87	2,6	2,1	1,4	6,5	$21{,}3\cdot10^{-4}$
4А90L2У3	3,0	2840	84,5	0,88	2,5	2,1	1,6	6,5	$35{,}3\cdot10^{-4}$
4А100S2У3	4,0	2880	86,5	0,89	2,5	2,0	1,6	7,5	$59{,}3\cdot10^{-4}$
4А100L2У3	5,5	2880	87,5	0,91	2,5	2,0	1,6	7,5	$75\cdot10^{-4}$
4А112М2У3	7,5	2990	87,5	0,88	2,8	2,0	1,8	7,5	$1{,}0\cdot10^{-2}$
4А132Н2У3	11,0	2990	88,0	0,90	2,8	1,7	1,5	7,5	$2{,}25\cdot10^{-2}$
4А160S2У3	15,0	2940	88,0	0,91	2,2	1,4	1,0	7,0	$4{,}75\cdot10^{-2}$
4А160М2У3	18,5	2940	88,5	0,92	2,2	1,4	1,0	7,0	$5{,}25\cdot10^{-2}$
4А180S2У3	22,0	2940	88,5	0,91	2,5	1,4	1,1	7,5	$7{,}0\cdot10^{-2}$
n=1500 об/мин (синхронная)									
4АА50А4У3	0,06	1380	50,0	0,60	2,2	2,0	1,7	2,5	$0{,}29\cdot10^{-4}$
4АА50В43У3	0,09	1370	55,0	0,60	2,2	2,0	1,7	2,5	$0{,}325\cdot10^{-4}$
4АА56А4У3	0,12	1375	63,0	0,66	2,2	2,1	1,5	3,5	$7{,}0\cdot10^{-4}$

Продолжение табл. П. 2.3

Тип двигателя	$P_{ном}$, кВт	При номинальной нагрузке			$\frac{M_{max}}{M_{ном}}$	$\frac{M_п}{M_{ном}}$	$\frac{M_{min}}{M_{ном}}$	$\frac{I_п}{I_{ном}}$	J, кг·м²
		n, об/мин	η, %	cos φ					
n=1500 об/мин (синхронная)									
4АА56В4У3	0,18	1365	64,0	0,64	2,2	2,1	1,5	3,5	$7{,}88\cdot10^{-4}$
4АА63А4У3	0,25	1380	68,0	0,65	2,2	2,0	1,5	4,0	$12{,}4\cdot10^{-4}$
4АА63В4У3	0,37	1365	68,0	0,69	2,2	2,0	1,5	4,0	$13\cdot10^{-4}$
4А71А4У3	0,55	1390	70,5	0,70	2,2	2,0	1,8	4,5	$13{,}8\cdot10^{-4}$
4А71В4У3	0,75	1390	72,0	0,73	2,2	2,0	1,8	4,5	$14{,}3\cdot10^{-4}$
4А80А4У3	1,10	1420	75,0	0,81	2,2	2,0	1,6	5,0	$32{,}3\cdot10^{-4}$
4А80В4У3	1,50	1415	77,0	0,83	2,2	2,0	1,6	5,0	$33{,}3\cdot10^{-4}$
4А90L4У3	2,20	1425	80,0	0,83	2,4	2,1	1,6	6,0	$56\cdot10^{-4}$
4А100S4У3	3,0	1435	82,0	0,83	2,4	2,0	1,6	6,0	$86{,}8\cdot10^{-4}$
4А100L4У3	4,0	1430	84,0	0,84	2,4	2,0	1,6	6,0	$1{,}13\cdot10^{-2}$
4А112М4У3	5,50	1445	85,5	0,85	2,2	2,0	1,6	7,0	$1{,}75\cdot10^{-2}$
4А132S4У3	7,5	1455	87,5	0,86	3,0	2,2	1,7	7,5	$2{,}75\cdot10^{-2}$
4А132М4У3	11,0	1460	87,5	0,87	3,0	2,2	1,7	7,5	$4\cdot10^{-2}$
4А160S4У3	15,0	1465	88,5	0,88	2,3	1,4	1,0	7,0	$10{,}3\cdot10^{-2}$
4А160М4У3	18,5	1465	89,5	0,88	2,3	1,4	1,0	7,0	$12{,}8\cdot10^{-2}$
4А180S4У3	22,0	1470	90,0	0,90	2,3	1,4	1,0	6,5	$19\cdot10^{-2}$
n=1000 об/мин (синхронная)									
4АА63А6У3	0,18	885	56,0	0,62	2,2	2,2	1,5	3,0	$2\cdot10^{-3}$
4АА63В6У3	0,25	890	59,0	0,62	2,2	2,2	1,5	3,0	$22\cdot10^{-4}$
4А71А6У3	0,37	910	64,5	0,69	2,2	2,0	1,8	4,0	$17\cdot10^{-4}$
4А71В6У3	0,55	900	67,5	0,71	2,2	2,0	1,8	4,0	$2\cdot10^{-3}$
4А80А6У3	0,75	915	69,0	0,74	2,2	2,0	1,6	4,0	$3\cdot10^{-3}$
4А80В6У3	1,10	920	74,0	0,74	2,2	2,0	1,6	4,0	$46\cdot10^{-4}$
4А90L6У3	1,50	935	75,0	0,74	2,2	2,0	1,7	4,5	$74\cdot10^{-4}$
4А100L6У3	2,20	950	81,0	0,73	2,2	2,0	1,6	5,0	$1{,}31\cdot10^{-2}$
4А112МВ6У3	4,0	950	82,0	0,81	2,5	2,0	1,8	6,0	$2\cdot10^{-2}$
4А112МА6У3	3,00	955	81,0	0,76	2,5	2,0	1,8	6,0	$1{,}8\cdot10^{-2}$
4А132S6У3	5,50	965	85,0	0,80	2,5	2,0	1,8	6,5	$4\cdot10^{-2}$
4А132М6У3	7,50	970	85,5	0,81	2,5	2,0	1,8	6,5	$5{,}8\cdot10^{-2}$
4А160S6У3	11,0	975	86,0	0,86	2,0	1,2	1,0	6,0	$13{,}8\cdot10^{-2}$
4А160М6У3	15,0	975	87,5	0,87	2,0	1,2	1,0	6,0	$18{,}3\cdot10^{-2}$
4А180М6У3	18,5	975	88,0	0,87	2,2	1,2	1,0	5,0	$22\cdot10^{-2}$
4А200М6У3	22,0	975	90,0	0,90	2,4	1,3	1,0	6,5	$4\cdot10^{-2}$
n=750 об/мин (синхронная)									
4А71В8У3	0,25	680	56,0	0,65	1,7	1,6	1,2	3,0	$18{,}5\cdot10^{-4}$
4А80А8У3	0,37	675	61,5	0,65	1,7	1,6	1,2	3,5	$33{,}8\cdot10^{-4}$
4А80В8У3	0,55	700	64,0	0,65	1,7	1,6	1,2	3,5	$40{,}5\cdot10^{-4}$
4А90LА8У3	0,75	700	68,0	0,62	1,9	1,6	1,2	3,5	$67{,}5\cdot10^{-4}$

Продолжение табл. П. 2.3

Тип двигателя	$P_{ном}$, кВт	При номинальной нагрузке			$\frac{M_{max}}{M_{ном}}$	$\frac{M_п}{M_{ном}}$	$\frac{M_{min}}{M_{ном}}$	$\frac{I_п}{I_{ном}}$	J, кг·м^2
		n, об/мин	η, %	$\cos\varphi$					
$n=750$ об/мин (синхронная)									
4A90LB8Y3	1,10	700	70,0	0,68	1,9	1,6	1,2	3,5	$86{,}3\cdot10^{-4}$
4A100L8Y3	1,50	700	74,0	0,65	1,9	1,6	1,2	4,0	$1{,}3\cdot10^{-2}$
4A112MA8Y3	2,20	700	76,5	0,71	2,2	1,9	1,4	5,0	$1{,}75\cdot10^{-2}$
4A112MB8Y3	3,0	700	79,0	0,74	2,2	1,9	1,4	5,0	$2{,}5\cdot10^{-2}$
4A132S8Y3	4,0	720	83,0	0,70	2,6	1,9	1,4	5,5	$4{,}25\cdot10^{-2}$
4A132M8Y3	5,50	720	83,0	0,74	2,6	1,9	1,4	5,5	$5{,}75\cdot10^{-2}$
4A160S8Y3	7,50	730	86,0	0,75	2,2	1,4	1,0	6,0	$13{,}8\cdot10^{-2}$
4A165M8Y3	11,0	730	87,0	0,75	2,2	1,4	1,0	6,0	$18\cdot10^{-2}$
4A180M8Y3	15,0	730	87,0	0,82	2,0	1,2	1,0	6,0	$25\cdot10^{-2}$
4A200M8Y3	18,5	735	88,5	0,84	2,2	1,2	1,0	5,5	$40\cdot10^{-2}$
4A200L8Y3	22,0	730	88,5	0,84	2,0	1,2	1,0	5,5	$45{,}3\cdot10^{-2}$

ОТВЕТЫ К ЗАДАЧАМ

Раздел первый

ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Глава 1

1.5. $r_1=6{,}7$ см; $r_2=41{,}5$ см. **1.6.** $F=6{,}43\cdot10^{-4}$ Н. **1.7.** $F_в=9{,}3\times10^{-3}$ Н. **1.8.** $Q_2=2{,}2\cdot10^{-6}$ Кл. **1.9.** $r=0{,}07$ м. **1.10.** $Q_2=0{,}46\times10^{-6}$ Кл. **1.11.** $r_{возд}=7{,}35$ см. **1.12.** $F_{12}=0{,}018$ Н; $F_{13}=0{,}12$ Н; $F_{23}=0{,}07$ Н. **1.13.** $E=0{,}3$ В/м. **1.14.** $Q=12\cdot10^{-4}$ Кл. **1.15.** $F=5{,}6\times10^{-6}$ Н. **1.16.** $Q=1{,}6\cdot10^{-8}$ Кл. **1.17.** $E=13{,}84$ кВ/м. **1.18.** $F=7{,}19\cdot10^{-2}$ Н; $E=1{,}22\cdot10^{3}$ кВ/м. **1.19.** $r=8$ см. **1.20.** $E=47$ В/м; $F=0{,}45\cdot10^{-8}$ Н. **1.21.** $E_4=6{,}68$ кВ/м. **1.22.** $Q=0{,}5\cdot10^{-7}$ Кл. **1.23.** $A=0{,}011$ Дж. **1.24.** $A=7{,}2\cdot10^{-2}$ Дж; $F=8\cdot10^{-5}$ Н. **1.25.** $U=50$ В; $A=275\cdot10^{-4}$ Дж. **1.26.** $U=360$ В. **1.27.** $\varphi=3$ В. **1.28.** $A=13{,}5\cdot10^{-6}$ Дж. **1.29.** $E_{пр}=17$ кВ/см. **1.30.** $U_1=60$ кВ; $U_2=15$ кВ, $U_3=18$ кВ. **1.31.** $U=9$ кВ. **1.32.** $d=0{,}017$ см. **1.33.** $E=625$ В/см; а) $U=250$ В; б) $U=750$ В. **1.34.** $U=107{,}5$ В. **1.35.** $C=0{,}4$ мкФ. **1.36.** $d=0{,}04$ см; $S=248$ см^2. **1.37.** $E=150\cdot10^{3}$ В/м; $C=0{,}66$ мкФ. **1.38.** $d_1=0{,}166$ мм; $d_2=0{,}0166$ мм; $S_1=1875$ см^2; $S_2=26{,}8$ см^2. **1.39.** $Q=27\cdot10^{-6}$ Кл; $E=18\cdot10^{3}$ В/м; $W=3{,}65\cdot10^{-4}$ Дж. **1.40.** $U=300$ В. **1.41.** $C=1{,}2$ мкФ. **1.42.** $W=0{,}02$ Дж. **1.43.** $U=250$ В. **1.44.** $C=0{,}025$ мкФ, $W=8\cdot10^{3}$ Дж. **1.45.** $Q=14{,}4\cdot10^{-8}$ Кл; $E_1=2$ кВ/см; $E_2=6{,}6$ кВ/см. **1.46.** $C=89{,}2$ пФ. **1.47.** $C=2{,}20$ пФ. **1.48.** $d=2$ мм; $C=220$ пФ. **1.49.** $C=0{,}35$ мкФ. **1.50.** $C_2=2$ мкФ. **1.51.** $C=6$ мкФ. **1.52.** $C=4$ мкФ. **1.53.** $C_3=0{,}2$ мкФ; $C=0{,}8$ мкФ. **1.54.** $C=1{,}5$ мкФ. **1.55.** а) $C_{min}=85$ пФ; $C_{max}=300$ пФ; б) $C_{min}=8{,}8$ пФ; $C_{max}=67$ пФ. **1.56.** $C_{эк1}=48{,}8$ пФ; $C_{эк2}=215$ пФ. **1.57.** $C=0{,}75$ мкФ. **1.58.** $C=3$ мкФ. **1.59.** $C_{эк}=3$ $C=36$ мкФ; $W=4{,}5\cdot10^{-2}$ Дж. **1.60.** $C_{AB}=2$ мкФ; $C_{DE}=1{,}5$ мкФ. **1.61.** $C_{эк1}=1$ мкФ. **1.62.** $Q_1=Q_2=0{,}12\cdot10^{-3}$ Кл; $U_1=30$ В; $U_2=120$ В; $W_1=1{,}8\times10^{-3}$ Дж; $W_2=7{,}2\cdot10^{-3}$ Дж. **1.63.** $C2=0{,}075$ мкФ; $C=0{,}03$ мкФ. **1.64.** $C1=54$ мкФ; $C2=27$ мкФ. **1.65.** $C=0{,}016$ мкФ; $U=350$ В; $U_1=280$ В; $U_2=70$ В. **1.66.** $U_1=175$ В; $U_2=70$ В; $U=245$ В; $C2=14000$ пФ. **1.67.** $C=0{,}28$ мкФ; $C1=0{,}056$ мкФ; $C2=0{,}224$ мкФ; $Q_1=25{,}2\cdot10^{-6}$ Кл; $Q_2=10^{-4}$ Кл. **1.68.** $Q_1=54\cdot10^{-6}$ Кл; $Q_2=81\times10^{-6}$ Кл; $Q_3=108\cdot10^{-6}$ Кл; $W=3{,}3\cdot10^{-3}$ Дж. **1.69.** $U=750$ В; $Q_1=3\cdot10^{-5}$ Кл; $Q_2=0{,}75\cdot10^{-5}$ Кл; $Q_3=2{,}25\cdot10^{-5}$ Кл; $W=225\times10^{-4}$ Дж. **1.70.** $U=240$ В; $U_1=192$ В; $U_2=U_3=48$ В; $W=2{,}3\times$

$\times 10^{-2}$ Дж; $W_1 = 1{,}84 \cdot 10^{-2}$ Дж; $W_2 = 2{,}88 \cdot 10^{-3}$ Дж; $W_3 = 1{,}72 \times$ $\times 10^{-3}$ Дж. **1.71.** $U_1 = 75$ В; $U_2 = 225$ В; $Q_1 = 75 \cdot 10^{-6}$ Кл; $Q_2 = 225 \times$ $\times 10^{-6}$ Кл; $Q_3 = 150 \cdot 10^{-6}$ Кл. **1.72.** $C \approx 3{,}8$ мкФ; $C1 = 1{,}07$ мкФ; $C2 = 3{,}2$ мкФ; $U_1' = 375$ В; $U_2 = 125$ В; $W = 0{,}475$ Дж. **1.73.** $U = 76$ В; $U' = 45$ В. **1.74.** $Q_1 = 0{,}64 \cdot 10^{-6}$ Кл; $Q_2 = 0{,}16 \cdot 10^{-6}$ Кл; $Q = 0{,}8 \times$ $\times 10^{-6}$ Кл; $U = 32$ В; $W_1 = 3{,}2 \cdot 10^{-6}$ Дж; $W_2 = 51{,}2 \cdot 10^{-6}$ Дж.

Глава 2

2.6. $I = 1{,}5$ А; **2.7.** $t = 1{,}2$ с. **2.8.** $J = 0{,}2$ А/мм^2. **2.9.** $I = 1{,}2$ А; $Q = 6 \cdot 10^{-3}$ Кл. **2.10.** $R_к = 2{,}3$ кОм. **2.11.** $l = 330$ м. **2.13.** $\Theta = 98$ °С. **2.16.** $l_{нихр} = 6$ м; $J = 33$ А/мм^2. **2.17.** $l = 155$ м; $J = 9{,}9$ А/мм^2. **2.18.** $l = 4{,}32$ м. **2.19.** $R_{20} = 1{,}85$ Ом; $R_{80} = 2{,}29$ Ом. **2.20.** $\Theta = 55$ °С. **2.21.** $\Theta = 46{,}8$ °С. **2.22.** $\Theta = 32{,}5$ °С. **2.23.** $U = 27$ В; $R = 7{,}7$ Ом. **2.24.** $t = 1{,}45$ ч; $I = 8$ А. **2.25.** $R = 13{,}3$ Ом; $I = 15$ А; $Q = 20\,736$ кДж; стоимость — 48 коп. **2.26.** $P = 1160$ Вт $= 1{,}16$ кВт; $I = 5{,}27$ А. **2.27.** $t = 6{,}4$ ч. **2.28.** $R_{AB} = 3{,}7$ Ом. **2.29.** $R_{эк} = 4{,}5$ Ом. **2.30.** $R_{AB} =$ $= 10$ Ом, $R_{CD} = 6{,}15$ Ом. **2.31.** $R_{AB} = \frac{7}{11} R$; $R_{BC} = 0$; $R_{CD} = \frac{10}{11} R$. **2.32.** $R_{AB} = R_{AC} = R_{EF} = \frac{11}{15} R$; $R_{CD} = \frac{3}{5} R$. **2.33.** $R_{AE} = \frac{1}{3} R$. **2.34.** $R_{AB} =$ $= 4$ Ом. **2.35.** $R = 2{,}1$ Ом. **2.36.** $G = 0{,}25$ Ом$^{-1}$; $R = 4$ Ом. **2.37.** $G =$ $= 0{,}07$ Ом$^{-1}$. **2.38.** $G_1 = 0{,}05$ Ом$^{-1}$ **2.39.** $G_2 = G_3 = 0{,}4$ Ом$^{-1}$. **2.40.** $U_{1-2} = 0{,}1$ В; $U_{1-3} = 1$ В; $U_{1-4} = 10$ В. **2.41.** $K_{1-2} = 100$; $K_{1-3} =$ $= 10$; $K'_{1-2} = 60$; $K'_{1-3} = 6$. **2.42.** $I = 0{,}12$ А; $U = 1{,}2$ В. **2.43.** $r = 1{,}5$ Ом. **2.44.** $r = 0{,}5$ Ом; $E = 24$ В. **2.45.** $U = 3{,}6$ В; $I = 0{,}72$ А. **2.46.** $I = 3{,}2$ А; $R = 75{,}6$ Ом; $P = 800$ Вт. **2.48.** $E = 1{,}2$ В. **2.49.** $E = 27{,}5$ В; $R = 43{,}6$ Ом; $P = 15{,}7$ Вт. **2.50.** 1) $U = 0 \div 300$ В; $I = 0 \div 2{,}5$ А; 2) $U = 60 \div 300$ В; $I =$ $= 0{,}5 \div 2{,}5$ А. **2.51.** $I = 0{,}5$ А; $U_1 = 50$ В; $U_2 = 15$ В; $U_3 = 60$ В; $P_1 =$ $= 25$ Вт; $P_2 = 7{,}5$ Вт; $P_3 = 30$ Вт. **2.52.** $R2 = 16$ Ом, $R3 = 8$ Ом, $U_1 =$ $= U_3 = 6$ В; $U_2 = 12$ В. **2.53.** $R1 = 10$ кОм; $R2 = 1$ кОм; $R_Д = 2{,}5$ кОм; $P = 54 \cdot 10^{-3}$ Вт. **2.54.** $R_{min} = 500$ Ом; $R_{max} = 27500$ Ом; $P_{нmin} = 0{,}25$ Вт; $P_{нmax} = 25$ Вт; $P_{pmin} = 2{,}75$ Вт; $P_{pmax} = 5$ Вт. **2.55.** $U = 125$ В; $R2 =$ $= 145$ Ом; $R3 = 350$ Ом. **2.56.** 1) $R1 = 24$ Ом; $R_{эк} = 100$ Ом; $P_{ист} =$ $= 25$ Вт; $U_1 = 12$ В; $U_2 = 8$ В; $U_3 = 30$ В. **2.57.** $U = 100$ В; $I_1 = 1{,}2$ А; $I_2 = 2$ А; $I_3 = 1{,}6$ А; $P = 480$ Вт. **2.58.** $U = 400$ В; $I = 3$ А; $I_2 = 0{,}8$ А; $I_3 = 0{,}2$ А; $I_4 = 1{,}3$ А; $G_1 = 1{,}75 \cdot 10^{-3}$ Ом$^{-1}$. **2.59.** $R = 200$ Ом; $G = 5 \cdot 10^{-3}$ Ом$^{-1}$; $I_1 = I_2 = 0{,}25$ А; $I_3 = 0{,}6$ А; $I_4 = 0{,}4$ А; $P = 450$ Вт. **2.60.** $I_1 = 0{,}3$ А; $I_2 = 0{,}2$ А; $I_{3,4} = 0{,}1$ А; $P = 8{,}1$ Вт. **2.61.** $R1 = 1936$ Ом; $R2 = 1210$ Ом; $R3 = 807$ Ом; $R4 = 484$ Ом; $R5 = 324$ Ом; $R6 = 97$ Ом. **2.62.** $I = 3{,}5$ А; $R = 63$ Ом; $Q = 332$ кДж. **2.63.** $I_2 = 0{,}05$ А; $I_3 = 0{,}035$ А; $R1 = 400$ Ом, $R2 = 560$ Ом; $U_{вх} = 62$ В; $P = 5{,}27$ Вт. **2.64.** $I_1 = 0{,}05$ А; $I_2 = 0{,}15$ А; $I_3 = 0{,}4$ А; $I_4 = 0{,}2$ А; $I_{общ} = 0{,}64$ А; $U_{AC} =$ $= U_{CD} = 45$ В; $U_{CB} = 75$ В; $U_{DB} = 120$ В. **2.65.** $U_{AB} = 80$ В; $I_1 = 0{,}075$ А; $I_2 = 0{,}1$ А; $I_3 = 0{,}125$ А; $R3 = 640$ Ом; $R4 = 200$ Ом. **2.66.** $R1 = R3 =$ $= 20$ Ом; $R2 = 5$ Ом; $I_1 = 0{,}4$ А; $I_2 = I_3 = 1{,}6$ А. **2.67.** $R1 = 20$ Ом; $R2 =$ $= 2$ Ом; $R4 = 5$ Ом; $R5 = 1$ Ом; $I_1 = 1{,}2$ А; $I_2 = 1{,}5$ А; $I_4 = 4$ А; $I_5 =$ $= 1$ А; $I_6 = 0{,}5$ А. **2.68.** $I_1 = 0{,}125$ А; $I_2 = 0{,}0875$ А; $I_3 = 0{,}0375$ А. **2.69.** $I = 7$ А; $I_1 = 4{,}2$ А; $I_2 = 2{,}8$ А; $I_3 = 2{,}34$ А; $I_4 = 0{,}46$ А; $U_1 = 105$ В;

$U_2 = 70$ В; $U_{3,4} = 35$ В; $P = 735$ Вт. **2.70.** $I_2 = 0{,}2$ А; $I_3 = 0{,}1$ А; $I_5 = 0{,}05$ А; $U = 27$ В; $R = 90$ Ом; $I_1 = 0{,}3$ А. **2.71.** $U_{ab} = -16{,}5$ В. **2.72.** $R = 7{,}5$ Ом; $U = 3{,}75$ В; $P = 1{,}875$ Вт. **2.73.** $I = 1{,}73$ А; $U_6 = 4{,}15$ В; $U_{изг} = 3{,}6$ В; $I_1 = 1{,}5$ А. **2.74.** $r = 0{,}35$ Ом. **2.75.** $I_{min} = 4$ А; $I_{max} = 0{,}8$ А; $P_{max} = 9{,}6$ Вт; $P_{min} = 1{,}9$ Вт. **2.76.** 5 элементов. **2.77.** $I_1 = 1$ А, $I_2 = 3$ А; $I_3 = 4$ А; $U_1 = 32{,}5$ В; $U_3 = 24$ В. **2.78.** $E_2 = 4{,}5$ В; $I_2 = 0{,}036$ А; $I_3 = 0{,}304$ А. **2.79.** $E_1 = 1{,}8$ В; $E_2 = 0{,}81$ В; $I_1 = 1{,}2$ А. **2.80.** 1) $r_1 = r_2 =$ $= 5$ Ом; $I_1 = 0{,}4$ А. **2.81.** $I_1 = 4{,}7$ А; $I_2 = 2{,}9$ А; $I_3 = 1{,}8$ А. **2.82.** $I_1 =$ $= 9{,}5$ мА; $I_2 = 48{,}6$ мА; $I_3 = 12{,}2$ мА; $I_4 = 51{,}3$ мА. **2.83.** $I_1 = 0{,}62$ А; $I_2 = 1{,}5$ А; $I_3 = 0{,}88$ А; $I_4 = I_5 = 0{,}44$ А. **2.84.** $I_1 = 0{,}1$ А; $I_{2,3} = 0{,}32$ А; $I_4 = 0{,}06$ А; $I_5 = 0{,}04$ А; $I_6 = 0{,}42$ А. **2.85.** $\Delta U = 9{,}5$ В; $P_н = 1{,}68$ кВт. **2.86.** $S = 15{,}9$ мм$^2 \approx 16$ мм^2 (по стандарту). **2.87.** $R_{пр} = 6{,}3$ Ом; $R_н =$ $= 42{,}5$ Ом; $P_н = 963$ Вт; $\eta = 81\%$. **2.88.** $I_х = 0$; $I_к = 50$ А; $\Delta U_х = 0$; $\Delta U_к = 45$ В. **2.89.** $l = 331$ м.

Глава 3

3.6. $\Phi_1 = 0{,}021$ Вб; $\Phi_2 = 0{,}019$ Вб; $\Phi_3 = 0{,}012$ Вб. **3.7.** $\Phi = 0{,}117$ Вб. **3.8.** $D = 16$ см. **3.9.** $B = 0{,}08$ Тл. **3.10.** $F_1 = 1{,}8$ Н; $F_2 = 0$. **3.11.** $B =$ $= 0{,}32$ Тл. **3.12.** $\alpha = 11{,}5°$. **3.13.** $I = 2{,}5$ А. **3.14.** $\alpha \approx 23°$. **3.15.** $I = 9$ А; $A = 0{,}225$ Дж. **3.16.** $I = 3{,}4$ А. **3.17.** $I = 2$ А. **3.18.** $H = 320$ А/м; $B =$ $= 0{,}4 \cdot 10^{-3}$ Тл. **3.19.** $I = 100$ А. **3.20.** $a = 40$ мм; $B = 0{,}5 \cdot 10^{-3}$ Тл. **3.21.** $H_{max} = 7053$ А/м; $B_{max} = 8{,}9 \cdot 10^{-3}$ Тл. **3.22.** $S = 35{,}4$ мм^2; $J =$ $= 4{,}25$ А/мм^2. **3.23.** $a = 2{,}5$ мм; $R = 25$ мм. **3.24.** $H = 480$ А/м. **3.25.** $I = 45$ А. **3.26.** $D = 62{,}5$ мм. **3.27.** $H_{max} = 2850$ А/м; $H_{min} = 2300$ А/м; $H = 2700$ А/м. **3.28.** $H_{max} = 17 \cdot 10^3$ А/м; $B_{max} = 21{,}4 \cdot 10^{-3}$ Тл; $H_{min} = 15{,}3 \cdot 10^3$ А/м; $B_{min} = 18{,}8 \cdot 10^{-3}$ Тл. **3.29.** $E = 27$ В; $r = 0{,}6$ Ом. **3.30.** $H = 1560$ А/м; $B = 1{,}27$ Тл; $\Phi = 1{,}27 \cdot 10^{-4}$ Вб. **3.31.** $R_к = 0{,}09$ Ом; $l = 25{,}6$ м. **3.32.** $w = 80$; $l = 4$ м. **3.33.** $I = 4{,}3$ А; $R_к = 22$ Ом; $\Phi =$ $= 0{,}85 \cdot 10^{-6}$ Вб. **3.34.** $\mu = 2170$; $\Phi = 8{,}5 \cdot 10^{-4}$ Вб. **3.35.** $H_{1,2} = 8000$ А/м; $B_1 = 0{,}01$ Тл; $B_2 = 1{,}5$ Тл; $I = 1{,}6$ А, $l_к = 0{,}25$ м. **3.36.** $L_1 = 1{,}96$ мГн; $L_2 = 1{,}56$ Гн. **3.37.** $L = 26{,}7$ мГн. **3.38.** $w = 200$; $I = 10$ А. **3.39.** $F = 18 \cdot 10^{-3}$ Н. **3.40.** $a = 4{,}3$ мм. **3.41.** $a = 32{,}2$ мм. **3.42.** $F = 0{,}135$ Н. **3.43.** $F = 1{,}4 \cdot 10^{-3}$ Н; $F_2 = 4{,}2 \cdot 10^{-3}$ Н; $F = 2{,}8 \times$ $\times 10^{-3}$ Н. **3.44.** $F_1 = 0{,}1 \cdot 10^{-2}$ Н; $F_2 = 0{,}45 \cdot 10^{-2}$ Н; **3.45.** $v = 15$ м/с; $b = 0{,}9$ м. **3.46.** $E = 6{,}36$ В. **3.47.** $l = 0{,}4$ м. **3.48.** $l = 0{,}49$ м; $b = 0{,}4$ м. **3.49.** $H = 77 \cdot 10^4$ А/м. **3.50.** $v_1 = 100$ м/с. **3.51.** $E = 14{,}4$ мВ. **3.52.** $S = 38{,}9$ см^2. **3.53.** $\Delta t = 0{,}25$ с. **3.54.** $\Phi = 21{,}6 \cdot 10^{-4}$ Вб. **3.55.** $S = 14{,}3$ см^2. **3.56.** $L = 0{,}76 \cdot 10^{-3}$ Гн. **3.57.** $\Psi_L = 12{,}25 \cdot 10^{-3}$ Вб. **3.58.** $I = 5{,}5$ А. **3.59.** $L = 0{,}17$ Гн. **3.60.** $I = 0{,}77$ А; $H = 2309$ А/м; $L = 0{,}079$ Гн. **3.61.** $L = 0{,}28 \cdot 10^{-3}$ Гн. **3.62.** $w = 240$; $L = 0{,}02$ Гн; **3.63.** $E = 48$ мВ. **3.64.** $L = 6{,}4 \cdot 10^{-3}$ Гн; $\Delta I/\Delta t = 250$ А/с. **3.65.** $\Delta I/\Delta t =$ $= 0{,}75$ А/с. **3.66.** $\Delta t = 3{,}2$ с; $\Delta I/\Delta t = 0{,}25$ А/с. **3.67.** $E = 15{,}5$ мВ. **3.68.** $\Psi_L = 1{,}8$ Вб; $W = 3{,}24$ Дж. **3.69.** $\Psi_L = 4$ Вб; $L = 0{,}625$ Гн. **3.70.** $I = 5{,}9$ А. **3.71.** $E_1 = 12$ В; $E_2 \approx 2{,}7$ В. **3.72.** $\Delta t = 0{,}5$ с; $E_2 = 18{,}8$ мВ. **3.73.** $\Delta t = 0{,}03$ с. **3.74.** $E = 2{,}1$ В. **3.75.** $L_{эк0} = 450$ мГн; $L_{эк1} = 317$ мГн; $L_{эк2} = 225$ мГн. **3.76.** $M = 0{,}0125$ Гн. **3.77.** $L_2 =$ $= 0{,}023$ Гн. **3.78.** $L_{согл} = 55$ мГн; $L_{встр} = 18{,}3$ мГн. **3.79.** $L = 300$ мГн; $L_{встр} = 72{,}5$ мГн. **3.80.** $E = 230$ мВ. **3.81.** $I = 0{,}96$ А. **3.82.** $\Psi_{12} =$ $= 0{,}126$ Вб. **3.83.** $M = 50$ мГн. **3.84.** $I_2 = 6{,}6$ А. **3.85.** $\Psi_{12} = 0{,}2$ Вб.

3.86. $M=0{,}0125$ Гн. **3.87.** $\Delta I=2{,}5$ А. **3.88.** $\Delta t=0{,}32$ с; $\Delta I/\Delta t=62{,}5$ А/с; $\Delta I=20$ А. **3.89.** $\Psi_L=1{,}8$ Вб; $W=10{,}8$ Дж. **3.90.** $W=0{,}42$ Дж. **3.91.** $L=416$ мГн; $\Psi_L=2{,}29$ Вб. **3.92.** $I=11$ А; $L\approx 0{,}011$ Гн. **3.93.** $I=6{,}7$ А; $L=0{,}08$ Гн. **3.94.** $L=48{,}5$ мГн; $\Delta t=0{,}5$ с. **3.95.** $W_1=153$ Дж; $W_2=60$ Дж; $\Delta W=93$ Дж; $E=18$ В. **3.96.** $L=950$ мкГн; $W=3\cdot 10^{-3}$ Дж. **3.97.** $L=0{,}11$ Гн; $W=7{,}9$ Дж. **3.98.** $w=1500$; $I=4{,}73$ А. **3.99.** $L=0{,}212$ Гн; $\mu=3000$. **3.100.** $\mu=1240$; $\Phi=28{,}6\cdot 10^{-3}$ Вб. **3.101.** $L=1{,}4\times\times 10^{-3}$ Гн; $W=8{,}6\cdot 10^{-3}$ Дж; $\Phi=8{,}3\cdot 10^{-6}$ Вб. **3.102.** $E_2=7{,}5$ мВ. **3.103.** $E_2=44$ мВ. **3.104.** $w\approx 159$. **3.105.** $w\approx 700$. **3.106.** $I=2{,}18$ А. **3.107.** $\Phi=0{,}57\cdot 10^{-4}$ Вб; $L=23$ мГн. **3.108.** $I=2{,}8$ А.

Глава 4

4.6. $2{,}5\cdot 10^{-3}$ с; $0{,}4\cdot 10^{-4}$ с; $0{,}5\cdot 10^{-3}$ с; $25\cdot 10^{-3}$ с; $0{,}8\cdot 10^{-3}$ с. **4.7.** 5 Гц; 1 Гц; 25 Гц; 20 кГц; 4 кГц; 1,25 мГц. **4.8.** 25 120 $с^{-1}$; 6280 $с^{-1}$; 31,4 $с^{-1}$; 125 600 $с^{-1}$; 7850 $с^{-1}$; $1{,}57\cdot 10^{6}$ $с^{-1}$. **4.9.** 500 Гц—$2\cdot 10^{-3}$ с; 150 Гц—$6{,}68\cdot 10^{-3}$ с; 2000 Гц—$5\cdot 10^{-4}$ с; 800 Гц—$1{,}25\cdot 10^{-3}$ с; 15 кГц—$66{,}8\cdot 10^{-6}$ с; 1600 Гц—$0{,}625\cdot 10^{-3}$ с. **4.10.** $p=8$. **4.11.** $n_2=600$ об/мин. **4.12.** $n=140$ об/мин; $\omega_p=14{,}7$ $с^{-1}$; $T=36\cdot 10^{-3}$ с; $\omega=176$ $с^{-1}$. **4.13.** $p_1=10$; $f=150$ Гц. **4.14.** $n=5060$ об/мин. **4.15.** $I_{max}=14{,}8$ А; $T=0{,}835\cdot 10^{-3}$ с; $\omega=7536$ $с^{-1}$. **4.16.** $U=156$ В; $f=450$ Гц. **4.17.** $I=320$ мА; $\omega=5024$ $с^{-1}$; $T=1{,}25\cdot 10^{-3}$ с. **4.18.** $I_{max}=16$ А; $I=11{,}3$ А; $T=40\cdot 10^{-3}$ с. **4.19.** $U=85$ В. **4.21.** $I=5{,}54$ А. **4.22.** $I_{max}=6{,}2$ А. **4.23.** $E_{max}=8{,}4$ В; $E=6$ В; $\omega=1256$ $с^{-1}$; $T=5\cdot 10^{-3}$ с; $\psi_e=\pi/4$. **4.27.** $U_1=28{,}4$ В; $U_2=42{,}5$ В; $\varphi=2\pi/3$; $t=1{,}67\cdot 10^{-3}$ с. **4.33.** $I_{max}=14{,}4$ А; $I=10{,}2$ А. **4.34.** $\psi_u=17°$. **4.35.** $f=250$ Гц. **4.41.** $I_{max}=3{,}2$ А; $I=2{,}26$ А; $f=40$ Гц; $\omega=250$ $с^{-1}$. **4.42.** $e=306$ В. **4.43.** $E_{max}=150$ В; $E=106{,}5$ В. **4.44.** $T=0{,}077$ с; $\omega=81{,}5$ $с^{-1}$; $\Phi_{max}=12\cdot 10^{-3}$ Вб. **4.45.** $\Phi_{max}=3\cdot 10^{-2}$ Вб. **4.46.** $f=230$ Гц; $E_{max}=5{,}2$ В.

Глава 5

5.6. $R=120$ Ом; $P=14{,}7$ Вт; $I=0{,}49$ А. **5.7.** $P=5{,}6$ Вт; $U_m=15$ В; $U=10{,}6$ В. **5.8.** $I_m=0{,}08$ А; $I=0{,}057$ А; $P=4{,}8$ Вт. **5.9.** $R=100$ Ом; $P=8{,}05$ Вт. **5.10.** $R=2$ кОм; $P=31{,}2$ Вт. **5.11.** $I=2{,}5$ А; $I_m=3{,}5$ А; $U=8$ В; $U_m=11{,}3$ В. **5.13.** $I_m=0{,}96$ мА; $I=0{,}68$ мА. **5.14.** $R=18{,}5$ Ом; $P=67{,}5$ Вт; $I=1{,}9$ А; $U=35{,}6$ В. **5.15.** $R1=90$ Ом; $R2=45$ Ом; $T=0{,}01$ с. **5.16.** $I=2{,}4$ А; $I_1=0{,}4$ А; $I_2=2$ А; $P=96$ Вт; $U_{вх}=40$ В. **5.17.** $R1=8$ Ом; $R2=9$ Ом; $R3=36$ Ом; $R_{эк}=15{,}2$ Ом; $P=567$ Вт; **5.18.** $I_1=1{,}0$ А; $I_{m1}=1{,}41$ А; $I_{m2}=1{,}13$ А; $I_3=0{,}2$ А; $I_{m3}=0{,}28$ А; $P_1=82$ Вт; $P_2=22{,}4$ Вт; $P_3=5{,}6$ Вт; $P=110$ Вт. **5.19.** $I_1=2$ А; $I_2=1{,}2$ А; $I_3=0{,}8$ А; $R1=60$ Ом; $R2=66{,}5$ Ом; $R3=100$ Ом; $U_1=120$ В; $U_{2,3}=80$ В. **5.20.** $I_1=43$ мА; $I_2=26$ мА; $I_3=17$ мА; $P=2{,}2$ Вт. **5.21.** $L=0{,}045$ Гн. **5.22.** $I=0{,}19$ А. **5.23.** $L=0{,}24$ мГн; $U=0{,}38$ В; $S=Q=0{,}12$ вар. **5.24.** $E_m=23{,}6$ В. **5.25.** $L=0{,}19$ Гн. **5.26.** $L=2$ мГн; $Q=0{,}075$ вар. **5.27.** $Q=172$ вар. **5.28.** $I=1{,}28$ А; $T=0{,}05$ с; $S=102$ В·А. **5.29.** $U=0{,}67$ В; $E=0{,}67$ В; $S=1{,}41\cdot 10^{-2}$ В·А. **5.30.** $L=29$ мГн; $X_L=37{,}4$ Ом; $Q=42$ вар; $E_{m1}=56$ В. **5.31.** $U_m=2{,}0$ В; $U=1{,}42$ В; $Q=4{,}25$ вар; $Q_2=1{,}85$ вар. **5.32.** $L_1=0{,}096$ Гн; $L_2=0{,}127$ Гн;

$X_1=24$ Ом; $X_2=32$ Ом; $E_{m1}=84{,}5$ В; $E_{m2}=112$ В. **5.33.** $\Phi_m=1{,}15\cdot 10^{-3}$ Вб; $f=100$ Гц. **5.34.** $w=28$; $I=2{,}1$ А. **5.35.** $U_m=960$ В; $B_m=0{,}65$ Тл; $Q=542$ вар. **5.36.** $L_1=0{,}266$ Гн; $L_2=0{,}495$ Гн; $L_3=0{,}570$ Гн; $U_{вх}=100$ В. **5.37.** $L_1=0{,}210$ Гн; $L_2=0{,}620$ Гн; $L_3=0{,}410$ Гн; $L=0{,}456$ Гн; $I_2=0{,}12$ А; $I_3=0{,}19$ А. **5.38.** $I=3{,}4$ А. **5.39.** $U_m=257$ В; $U=182$ В. **5.40.** $R1=135$ Ом; $L=0{,}248$ Гн; $U_R=9{,}6$ В; $U_L=16{,}6$ В. **5.41.** $\varphi=36°$; $P=2{,}32$ Вт; $Q=1{,}69$ вар; $S=2{,}88$ В·А. **5.42.** $U_R=28{,}3$ В; $U_L=23{,}8$; $L=0{,}084$ Гн. **5.44.** $L=35{,}4$ мГн; $S=146$ В·А; $P=28{,}8$ Вт; $Q=144$ вар. **5.45.** $S=22{,}5$ В·А; $Q=18$ вар; $\varphi=53°$. **5.46.** $Z=32$ Ом; $R=27{,}4$ Ом; $X_L=16{,}6$ Ом; $P=79$ Вт; $S=92{,}5$ В·А. **5.47.** $Q=54{,}3$ вар; $f=860$ Гц; $\varphi=48°12'$. **5.48.** $X_L=252$ Ом; $Z=294$ Ом; $S=26{,}4$ В·А. **5.49.** $Z=250$ Ом; $R=242$ Ом; $X_L=69{,}4$ Ом; $L=55{,}3$ мГн; $S=5{,}2$ В·А; $Q=1{,}44$ вар; $\cos\varphi=0{,}961$. **5.50.** $Z=17{,}5$ Ом; $R=15{,}9$ Ом; $X_L=7{,}45$ Ом; $L=1{,}48\cdot 10^{-3}$ Гн. **5.51.** $Z=0{,}725$ Ом; $R=0{,}286$ Ом; $X_L=0{,}667$ Ом; $L=0{,}266$ мГн; $P=39{,}4$ Вт; $Q=92$ вар. **5.52.** $Z=109$ Ом; $R=54{,}5$ Ом; $X_L=94{,}5$ Ом; $\cos\varphi=0{,}5$. **5.53.** $S=22{,}2$ В·А; $P=10$ Вт; $Q=19{,}8$ вар; $\cos\varphi=0{,}452$. **5.54.** $Z=16{,}7$ Ом; $R=10{,}7$ Ом; $X_L=12{,}8$ Ом; $f=4100$ Гц. **5.55.** $Z=38{,}2$ Ом; $R=29{,}2$ Ом; $\cos\varphi=0{,}766$. **5.56.** $Z=1870$ Ом; $R=1310$ Ом; $S=37{,}4$ В·А; $P=26{,}2$ Вт; $Q=26{,}7$ вар. **5.57.** $Z=1{,}69$ Ом; $R=1{,}44$ Ом; $X_L=0{,}88$ Ом; $L=3{,}5\cdot 10^{-3}$ Гн; $\cos\varphi=0{,}852$. **5.58.** $R_к=20$ Ом; $L_к=0{,}11$ Гн; $\cos\varphi=0{,}96$. **5.59.** $I=9$ А; $U=111$ В; $Z=12{,}3$ Ом; $R=7{,}4$ Ом; $X_L=9{,}8$ Ом; $S=999$ В·А; $Q=799{,}2$ вар. **5.60.** $Z=8{,}4$ Ом; $R=3{,}4$ Ом; $L=0{,}049$ Гн; $U=59$ В. **5.61.** $I=1{,}8$ А; $U_{вх}=60{,}5$ В; $\cos\varphi=0{,}299$; $P=32{,}5$ Вт. **5.62.** $Z=6{,}9$ Ом; $R=2{,}5$ Ом; $X_L=6{,}4$ Ом; $L=1{,}7\cdot 10^{-3}$ Гн. **5.63.** $Z=800$ Ом; $R=250$ Ом; $S=18$ В·А; $P=5{,}6$ Вт; $Q=17{,}1$ вар; $f=500$ Гц. **5.64.** $L_2=0{,}125$ Гн; $R_2=40$ Ом. **5.65.** $Z_к=52$ Ом; $R_к=13{,}6$ Ом; $X_к=50{,}3$ Ом; $Z=63{,}5$ Ом; $\varphi=52°30'$; $\varphi_к=75°$. **5.66.** $I=5{,}5$ А. **5.67.** $U_{вх}=250$ В; $I=0{,}81$ А; $S=201$ В·А; $P=110$ Вт; $Q=168$ вар; $\varphi_1=71°18'$; $\varphi_2=53°$; $\varphi=56°45'$; $\cos\varphi_1=0{,}32$; $\cos\varphi_2=0{,}6$; $\cos\varphi=0{,}548$. **5.70.** $I=2{,}38$ А; $\Phi_m=8{,}4\cdot 10^{-4}$ Вб. **5.71.** $U=43{,}6$ В; $f=720$ Гц; $L_к=12{,}3\cdot 10^{-3}$ Гн. **5.74.** $C=75$ мкФ. **5.75.** $U=160$ В; $U_m=226$ В; $X_C=3200$ Ом. **5.76.** $X_C=53$ Ом; $I=0{,}68$ А. **5.77.** $T=25{,}6$ мкс. **5.78.** $C=13{,}7$ мкФ. **5.79.** $I=0{,}08$ А. **5.80.** $X_C=25$ Ом; $C=12{,}7$ мкФ. **5.81.** $C=1{,}48$ мкФ; $U=490$ В; $Q=-2{,}22$ квар. **5.82.** $C=0{,}97$ мкФ; $X_C=472$ Ом; $S=Q=-122$ вар. **5.83.** $I=44$ мА; $U_1=35$ В; $U_2=70$ В. **5.84.** $C1=27{,}9$ мкФ; $C2=93$ мкФ; $U_1=2{,}1$ В; $U_2=6{,}4$ В; $Q_1=-1{,}1$ вар; $Q_2=-3{,}3$ вар; $Q_{об}=-4{,}4$ вар. **5.85.** $Q=-375$ вар; $C1=1{,}63$ мкФ. **5.86.** $C1=2{,}0$ мкФ; $C2=1{,}18$ мкФ; $C=0{,}745$ мкФ; $I=0{,}81$ А; $Q=-53{,}5$ вар. **5.87.** $I_1=0{,}05$ А; $I_2=0{,}1$ А; $C1=1{,}5$ мкФ; $C2=3$ мкФ; $Q=-15{,}9$ вар; $Q_1=-5{,}3$ вар; $Q_2=-10{,}6$ вар. **5.88.** $U_{вх}=135$ В; $I=4{,}34$ А; $I_2=3{,}06$ А; $S=Q=-586$ вар. **5.89.** $U_{вх}=97$ В; $I_1=0{,}53$ А; $I_2=0{,}32$ А; $S=Q=-82{,}4$ вар. **5.90.** $C1=0{,}49$ мкФ; $C2=0{,}12$ мкФ; $S=Q=-505$ вар. **5.91.** $C1=1$ мкФ; $C2=2$ мкФ; $C3=3$ мкФ; $U_{вх}=56$ В. **5.92.** $C2=1{,}25$ мкФ; $C3=0{,}23$ мкФ; $I_2=0{,}43$ А; $I_3=0{,}1$ А; $S=Q=-61{,}6$ вар. **5.93.** $R=34{,}6$ Ом; $C=22$ мкФ; $S=28{,}8$ В·А; $P=22$ Вт. **5.94.** $R=1{,}1$ Ом; $C=38$ мкФ; $S=61$ В·А; $P=22{,}5$ Вт; $Q=-56{,}7$ вар; $U=13{,}5$ В. **5.95.** $I=855$ мА; $S=428$

В·А; $Q=-282$ вар; $Z=585$ Ом; $R=440$ Ом; $X_C=385$ Ом. **5.96.** $I=1{,}2$ А; $U=37$ В; $S=44{,}5$ В·А; $P=14{,}4$ Вт; $Z=30{,}8$ Ом; $R=10$ Ом; $X_C=29{,}2$ Ом; $C=54{,}5$ мкФ. **5.97.** $Z=60$ Ом; $X_C=53{,}5$ Ом; $R=27{,}2$ Ом; $S=1470$ В·А $=1{,}47$ кВ·А; $U_R=135$ В; $U_C=265$ В. **5.98.** $I=12$ А; $U=51$ В; $R=3{,}5$ Ом; $C=327$ мкФ; $S=615$ В·А; $Q=-352$ вар. **5.99.** $R=31{,}4$ Ом; $Z=55$ Ом; $C=140$ мкФ; $S=216$ В·А; $P=123$ Вт; $Q=-178$ вар. **5.100.** $U_{вх}=220$ В; $Z=780$ Ом; $R=450$ Ом; $S=62{,}5$ В·А; $P=36$ Вт; $Q=-51$ вар. **5.101.** $C=35$ мкФ; $R=14{,}2$ Ом; $S=4{,}6$ В·А; $P=4{,}3$ Вт; $Q=-1{,}72$ вар; $U_{вх}=8{,}4$ В; $\cos\varphi=0{,}935$. **5.102.** $U_{вх}=175$ В; $I_R=0{,}83$ А; $R=210$ Ом; $S=192$ В·А; $P=145$ Вт; $Q=-126$ вар; $\cos\varphi=0{,}756$. **5.103.** $Z=17{,}8$ Ом; $I=1{,}68$ А; $S=50{,}5$ В·А; $\cos\varphi=0{,}366$. **5.104.** $I=2{,}86$ А; $Z=27{,}4$ Ом; $S=223$ В·А; $P=81{,}5$ Вт; $Q=-208$ вар. **5.105.** $Z=125$ Ом; $R_к=110$ Ом; $S=5$ В·А; $P=4{,}4$ Вт; $Q=2{,}4$ вар. **5.106.** $Z=142$ Ом; $U_{вх}=50{,}5$ В; $S=17{,}9$ В·А; $\cos\varphi=0{,}648$. **5.107.** $L=0{,}164$ Гн; $R_к=204$ Ом; $C=1{,}85$ мкФ; $S=35{,}3$ В·А; $Q=30{,}4$ вар. **5.109.** $Z=850$ Ом; $L=1{,}87$ Гн; $R_к=800$ Ом; $C=10{,}6$ мкФ. **5.110.** $I=2{,}8$ А; $U_{вх}=327$ В; $Z=117$ Ом; $R=53{,}5$ Ом; $X=104$ Ом; $C=1{,}1\cdot10^{-6}$ Ф; $L=12\cdot10^{-3}$ Гн. **5.111.** $S=293$ В·А; $Q=276$ вар; $R_к=85{,}5$ Ом; $L_к=0{,}028$ Гн; $C=4\cdot10^{-6}$ Ф. **5.112.** $U_{вх}=76$ В; $S=27{,}6$ В·А; $Q=25$ вар; $R_к=90$ Ом; $L_к=0{,}029$ Гн; $C=3{,}56\cdot10^{-6}$ Ф. **5.113.** $C_{рез}=39$ мкФ; $I_{рез}=6{,}25$ А; $S=P=625$ Вт; $Q=0$. **5.114.** $L_{рез}=29$ мГн; $I_{рез}=0{,}27$ А. **5.115.** $f_0=1500$ Гц; $I_{рез}=0{,}48$ А; $U_R=60$ В; $U_L=U_C=90{,}5$ В. **5.116.** $C_{рез}=3{,}28\cdot10^{-6}$ Ф; $f_0=750$ Гц; $I_{рез}=1{,}18$ А; $U_R=42{,}5$ В; $U_L=U_C=76{,}5$ В; $S=P=50$ Вт. **5.117.** $f_0=120$ Гц; $I_{рез}=4{,}25$ А; $R=4{,}05$ Ом; $U_L=U_C=320$ В. **5.118.** $C=0{,}18$ мкФ; $L=44$ мГн; $U_{вх}=10$ В; $U_L=U_C=40$ В; $\varphi=84°40'$. **5.119.** $I=6{,}4$ А; $I_L=6{,}25$ А; $I_R=1{,}25$ А; $y=0{,}127$ Ом$^{-1}$; $g=0{,}025$ Ом$^{-1}$; $b=0{,}125$ Ом$^{-1}$; $S=320$ В·А; $P=62{,}5$ Вт; $Q=312$ вар; $\cos\varphi=0{,}195$. **5.120.** $C=130$ мкФ; $g=0{,}025$ Ом$^{-1}$; $b=0{,}012$ Ом$^{-1}$; $y=0{,}0278$ Ом$^{-1}$; $b_L=0{,}125$ Ом$^{-1}$; $b_C=-0{,}113$ Ом$^{-1}$. **5.121.** $I=2{,}16$ А; $I_p=2{,}06$ А; $I_L=1{,}25$ А; $I_C=1{,}87$ А; $S=108{,}5$ В·А; $P=102$ Вт; $Q=31{,}4$ вар; $\cos\varphi=0{,}945$; $I_a=2{,}04$ А; $I_p=0{,}7$ А. **5.122.** $C_{рез}=0{,}42$ мкФ; $I=1{,}125$ А; $I_1=1{,}5$ А; $I_C=I_L=0{,}99$ А; $S=P=171$ Вт; $\cos\varphi=1$. **5.123.** $f_0=92$ Гц; $I=0$; $I_L=I_C=1{,}08$ А. **5.124.** $L=88{,}5$ Гн; $I=10$ мА; $I_1=20{,}5$ мА; $I_L=I_C=18{,}2$ мА. **5.125.** $C_{рез}=2$ мкФ; $f_0=615$ Гц; $U_{вх}=75$ В; $I=1{,}1$ А; $I_a=0{,}86$ А; $I_p=0{,}58$ А; $S=82{,}5$ В·А; $P=64{,}5$ Вт; $Q=43{,}5$ вар; $S_{рез}=P_{рез}=64{,}5$ Вт; $Q_{рез}=0$; $I_{рез}=0{,}86$ А; $I_{aрез}=0{,}86$ А; $I_{pрез}=0$.

Глава 6

6.6. $U_ф=110$ В; $U_л=190{,}5$ В; $I_л=0{,}88$ А; $S=290{,}4$ Вт. **6.7.** $I_A=0{,}44$ А; $I_C=0{,}88$ А. **6.8.** $R_н=5$ Ом; $X_н=8{,}7$ Ом; $Z_н=10{,}0$ Ом; $P=7{,}26$ кВт; $Q\approx12{,}6$ квар; $S=14{,}5$ кВ·А. **6.9.** $U_л=488$ В; $U_ф=282$ В; $I_ф=6{,}8$ А; $S=5{,}75$ кВ·А; $Q=3{,}25$ квар. **6.10.** $Z=176$ Ом; $R=80{,}5$ Ом; $L=0{,}499$ Гн$\approx0{,}5$ Гн; $S=825$ В·А. **6.11.** $U_ф=190{,}5$ В; $I_A=I_B=I_C=6{,}35$ А; $U_A=U_C=110$ В; $U_B=188$ В; $I'_A=I'_C=5{,}5$ А; $I'_B=0$. **6.12.** $U_B=114$ В; $U_C=266$ В; $U_A=338$ В. **6.13.** $U_ф=110$ В; $U_л=190$ В; $I_л=I_ф=1{,}7$ А; $P_н=442$ Вт; $Q_н=345$ вар. **6.14.** $U=112$ В.

6.15. $U_т=495$ В; $U_н=405$ В; $\Delta U_л=53$ В; $I_л=15$ А. **6.16.** $U_ф=220$ В; $I_ф=10{,}5$ А; $S=6{,}9$ кВ·А; $P=5{,}9$ кВт; $Q=3{,}6$ квар. **6.17.** $P=10{,}9$ кВт. **6.18.** $I_л=1{,}27$ А; $I_N=0$. **6.20.** $I_N=22{,}9$ А. **6.21.** $I_A=11$ А; $I_B=5{,}5$ А; $I_C=22$ А; $I_N=14{,}5$ А; $P=8{,}5$ кВт. **6.22.** $I_A=3$ А; $I_B=2{,}8$ А; $I_C=1{,}2$ А; $U_A=144$ В. **6.23.** $I_л=I_ф=2{,}4$ А; $I_N=0$; $R_ф=52{,}9$ Ом; $U_ф=127$ В. **6.24.** $I_{N1}=8{,}3$ А. **6.26.** $U_ф=120$ В; $I_C=I_B=4{,}8$ А; $I_A=2$ А; $P=1{,}15$ кВт; $Q=-0{,}24$ квар; $S=1{,}2$ кВ·А; $I_N=5{,}1$ А. **6.27.** $S=275$ В·А; $I_N=3{,}4$ А. **6.28.** $Z_B=91{,}7$ Ом, емкостный. **6.29.** $I_{л(A,C)}=0{,}58$ А; $R_{л(A,C)}=119$ Ом; $I_{л(B)}=0{,}86$ А; $R_{л(B)}=81$ Ом; $I_N=8$ А; $S=1{,}76$ кВ·А; $I'_N=1{,}1$ А. **6.31.** $X=66{,}5$ Ом; $R=66{,}5$ Ом; $Z=94$ Ом. **6.33.** 1) $I_A=1{,}76$ А; $I_B=2{,}5$ А; $I_C=1{,}1$ А; $P=380$ Вт; $Q=275$ вар; $S=470$ В·А. **6.34.** 1) $I_N=1{,}2$ А. **6.35.** $\cos\varphi=0{,}735$. **6.36.** $R_ф=8$ Ом; $U_ф=127$ В; $I_л=27{,}7$ А; $P=6{,}1$ кВт. **6.37.** $n=30$. **6.38.** $I_4=29{,}4$ А; а) $I_3=17$ А; $I_2=I_1=8{,}5$ А; $I_4=25{,}5$ А; б) $I_3=0$; $I_2=I_1=I_4=17$ А; в) $I_1=I_3=0$; $I_2=I_4=17$ А. **6.39.** $P=377$ Вт; $Q=-136$ вар; $S=400$ В·А; $I_A=3{,}75$ А; $I_B=1{,}3$ А; $I_C=2{,}75$ А. **6.40.** $R_к=11{,}8$ Ом; $L_к=27$ мГн; $\cos\varphi=0{,}818$; $S=3{,}3$ кВ·А. **6.41.** $I_ф=1{,}49$ А; $R_к=216$ Ом; $X_к=134$ Ом; $L_к=0{,}42$ Гн; $Q=0{,}9$ квар; $S=1{,}7$ кВ·А; $I_л=2{,}57$ А. **6.42.** $I_{AB}=I_{BC}=I_{CA}=8$ А; $I_A=I_B=I_C=13{,}8$ А; $P=1{,}76$ кВт; $S=1{,}76$ кВ·А. **6.43.** $R_н=7$ Ом; $C_н=181$ мкФ; $\cos\varphi=0{,}368$; $S=22{,}8$ кВ·А; $I_л=34{,}6$ А. **6.50.** $U_ф=468$ В; $I_ф=5{,}76$ А; $I_л=10$ А; $S=8{,}1$ кВ·А. **6.51.** $S=17{,}5$ кВ·А; $\cos\varphi=0{,}986$. **6.53.** $I_л=I_ф=7{,}9$ А; $I'_ф=13{,}6$ А; $I'_л=23{,}5$ А. **6.55.** а) $I_л=1{,}5$ А; $S=330$ В·А; б) $I_л=4{,}5$ А; $S=990$ В·А. **6.56.** $I_л=14{,}7$ А; $L_н=0{,}071$ Гн; $R_н=13$ Ом; $S_н=5{,}6$ кВ·А; $U_н=220$ В; $I'_л=4{,}9$ А; $S=1{,}86$ кВ·А. **6.57.** $R_к=90$ Ом; $L_к=0{,}45$ Гн. **6.58.** $I_л=I_ф=4{,}8$ А; $I'_ф=8{,}3$ А; $I'_л=14{,}4$ А; $P=2{,}4$ кВт. **6.59.** $R_н=9$ Ом; $X_н=24$ Ом; $P_н=2$ кВт; $Q=5{,}3$ квар; $S=5{,}7$ кВ·А.

Глава 7

7.11. $E_1=216{,}8$ В. **7.12.** $w_2=330$. **7.13.** $S=0{,}006$ м^2. **7.14.** $n=34{,}375$. **7.15.** $n_1=44$; $n_2=35$; $n_3=18{,}3$. **7.16.** $U_2=400$ В; $J_1=3{,}5$ А/мм^2; $J_2=3{,}75$ А/мм^2. **7.17.** $P_э=8$ Вт; $P_с=67$ Вт. **7.18.** $E_1=6014$ В; $E_2=233$ В. **7.19.** $P_э=64$ Вт; $P_с=276$ Вт. **7.20.** $U_1=131$ В; $U_2=2{,}18$ В; $\cos\varphi=0{,}286$. **7.21.** $w=713$; $w_2=22$. **7.22.** $I_2=6$ А. **7.23.** $n=59{,}3$. **7.24.** $\eta=0{,}93$. **7.25.** Уменьшится на 1,238 А. **7.26.** $\cos\varphi=0{,}8$. **7.27.** $X=151$ Ом. **7.28.** $\eta=0{,}8$; $S_1=1{,}4$ мм^2; $S_2=23{,}8$ мм^2. **7.29.** $P_э=0{,}66\%$ $P_к$. **7.30.** $n=25$; $w_2=800$. **7.31.** $n=27{,}2$; $w_1=6818$. **7.32.** $U_{2к}=233{,}3$ В. **7.33.** $I_2=275$ А. **7.34.** $w_1=3964$; $w_2=216$. **7.35.** $S_1=4$ мм^2; $S_2=60$ мм^2. **7.36.** $\eta=0{,}92$. **7.37.** $I_{1ном}=78{,}94$ А; $I_{2ном}=136{,}5$ А; $U_2=211{,}1$ В. **7.38.** $I_{1ном}=22{,}72$ А; $I_{2ном}=333{,}2$ А; $n=14{,}6$; $w_1=352$. **7.39.** $B=0{,}244$ Тл; $U_{вх}=1{,}125\%$; $U_р=5{,}38\%$; $E_2=660$ В. **7.40.** $U_1=19{,}9$ В; $I_2=45$ А; $\cos\varphi=0{,}9$. **7.41.** $S_{ном}=5646$ В·А. **7.42.** $\eta=0{,}87$. **7.43.** $\Delta U=0{,}22$ В; $\Delta U=1{,}8\%$. **7.44.** $I_{1ном}=4{,}5$ А; $I_{2ном}=75$ А. **7.45.** $\beta=1{,}0025$. **7.46.** $\eta_{ср}=0{,}48$. **7.47.** $\beta=1{,}045$. **7.48.** $\Delta U=3{,}76\%$. **7.49.** $P_2=13\,680$ Вт. **7.50.** $\eta_{ном}=0{,}89$; $P_2=1335$ Вт. **7.51.** $\Delta U=3{,}4\%$. **7.52.** $n=25$; $I_1=16$ А; $I_2=400$ А; $I_к=0{,}384$ А; $\eta=0{,}975$; $\Delta U=2{,}81\%$; $\Delta U=1{,}4\%$. **7.53.** $\Delta U_а=7{,}5\%$. $\Delta U_L=3{,}2\%$; $\Delta U_C=-4{,}72\%$. **7.54.** $R_к=0{,}132$ Ом; $R_к=8$ Ом;

$R1 = 14{,}75$ Ом. **7.55.** $n = 5{,}2$; $\eta = 0{,}947$; $R1 = 133{,}67$ Ом; $R2 = 5{,}2$ Ом. **7.56.** $n = 16{,}0$; $P_c = 70$ Вт; $\cos\varphi_к = 0{,}1$; $R_к = 0{,}06$; $X_к = 0{,}029$ Ом; $Z_к = 0{,}066$ Ом; $\cos\varphi_к = 0{,}89$; $\eta = 0{,}95$. **7.57.** При $\cos\varphi = 0{,}6$ $\Delta U_{2L} = 4{,}38\%$, $\Delta U_{2C} = -2\%$; при $\cos\varphi = 0{,}8$ $\Delta U_{2L} = 3{,}97\%$, $\Delta U_{2C} = -0{,}82\%$, при $\cos\varphi = 1$ $\Delta U = 1{,}97\%$. **7.58.** $U_2 = 394{,}9 \div 403{,}8$ В. **7.59.** 1:0,75; $S_1 = 63$ кВА; $S_2 = 47{,}25$ кВ·А. **7.60.** $S_1 = 61{,}8$ кВ·А; $S_2 = 88{,}2$ кВ·А. **7.61.** $S_{общ} = 250$ кВ·А. **7.62.** $\eta_{0{,}25} = 0{,}976$; $\eta_{0{,}5} = 0{,}979$; $\eta_{0{,}75} = 0{,}976$; $\eta_{1{,}0} = 0{,}971$. **7.63.** $w_{1ф} = 1121$; $w_2 = 45$. **7.64.** $n_{Y/Y} = 26$; $n_{Y/\Delta} = 44{,}98$; $n_{\Delta/Y} = 15$; $n_{\Delta/\Delta} = 44{,}98$; $U_{2\Delta/\Delta} = 384{,}6$ В; $U_{2Y/Y} = 384{,}6$ В; $U_{2Y/\Delta} = 222{,}3$ В; $U_{2\Delta/Y} = 666{,}6$ В. **7.65.** $w_1 = 643$; $w_2 = 47$. **7.66.** $n_{Y/Y} = 13{,}6$; $n_{Y/\Delta} = 23{,}5$; $U_{2Y/Y} = 220$ В; $U_{2Y/\Delta} = 127{,}5$ В. **7.67.** $I_1 = 4{,}8$ А; $I_2 = 130$ А. **7.68.** Можно 8,8 кВт. **7.69.** $I_1 = 2{,}85$ А; $I_2 = 116{,}77$ А. **7.70.** $I_{1ном} = 9{,}63$ А; $I_{2ном} = 250$ А; $w_1 = 1350$; $w_2 = 52$. **7.71.** $Z_к = 4{,}78$ Ом; $R_к = 2{,}33$ Ом; $X_к = 4{,}17$ Ом. **7.72.** $\eta_1 = 0{,}967$; $\eta_2 = 0{,}965$; $\eta_3 = 0{,}968$. **7.73.** $I_{1ном} = 1$ А; $I_{2ном} = 14{,}45$ А; $R1 = 193{,}6$ Ом; $X_1 = 5777$ Ом. **7.74.** Для $\cos\varphi = 0{,}8$; $\Delta U_L = 3{,}8\%$; $\Delta U_C = -2{,}2\%$. **7.75.** $\Delta U_L = 5{,}59\%$; $U_{2L} = 377{,}6$ В; $\Delta U_C = -4\%$; $U_{2C} = 416$ В. **7.76.** $U_{2L} = 364{,}8$ В; $U_{2C} = 383$ В. **7.77.** $U_{2лY/Y} = 6000$ В; $U_{2ф} = 3468$ В; $U_{2лY/\Delta} = 10\,380$ В; $U_{2ф} = 10\,380$ В; $U_{2л\Delta/Y} = 3468$ В; $U_{2ф} = 2004$ В. **7.78.** $w_2 = 200$. **7.79.** $w_2 = 2000$. **7.80.** $I_1 = 510$ А. **7.81.** $K_1 = 200$. **7.82.** $w_1 = 7059$; $w_2 = 118$. **7.83.** $K_U = 100$; $U_1 = 10\,000$ В. **7.84.** $K_1 = 50$; $I_{1ном} = 250$ А; $I_2 = 1{,}9$ А. **7.85.** $I_2 = 1$ А. **7.86.** $I_1 = 280$ А; $I_2 = 3{,}5$ А. **7.87.** $K_1 = 48$. **7.88.** $P_1 = 912$ кВт. **7.89.** $P_1 = 2480$ кВт. **7.90.** $U_2 = 149{,}25$ В. **7.91.** $I_1 = 400$ А; $U_1 = 6000$ В; $P_1 = 2\,106\,000$ Вт; $\cos\varphi = 0{,}87$. **7.92.** $P_1 = 4636$ Вт; $\cos\varphi = 0{,}86$. **7.93.** $U_{min} = 0{,}95$ В. **7.94.** $U_{25} = 30{,}5$ В; $U_{50} = 61$ В; $U_{100} = 122$ В; $U_{180} = 220$ В. **7.95.** $w_2 = 996$. **7.96.** $I_2 = 15{,}57$ А. **7.97.** $w_1 = 20$; $w_2 = 100$; $w_3 = 150$; $w_4 = 200$; $w_5 = 254$; $w_6 = 300$. **7.98.** $K_в = 0{,}42$.

Глава 8

8.6. $\Delta U_{max} = 0{,}15$ В; $\beta_1 = 3\%$; $\beta_2 = 1{,}5\%$; $\beta_3 = 1\%$; $\beta_4 = 0{,}75\%$; $\beta_5 = 0{,}6\%$; $\beta_6 = 0{,}5\%$. **8.7.** Класс точности 0,5; $\beta_1 = 1{,}8\%$, $\beta_2 = 0{,}9\%$; $\beta_3 = 0{,}8\%$; $\beta_4 = 0{,}72\%$; $\beta_5 = 0{,}6\%$. **8.8.** Класс точности 0,2. **8.9.** $I_{пр} = 50$ А; $\Delta I_{max} = 0{,}75$ А; $\beta_1 = 15\%$; $\beta_2 = 5\%$; $\beta_3 = 3\%$; $\beta_4 = 2{,}1\%$; $\beta_5 = 1{,}65\%$. **8.11.** $U_{max\,1} = 815$ мВ; $U_{min\,1} = 785$ мВ. **8.12.** Класс точности 1,0; $\beta = 4{,}25\%$. **8.13.** $r_ш = 0{,}004$ Ом; класс точности 1,0. **8.14.** $r_ш = 0{,}0102$ Ом; $I_{пр} = 0{,}15$ А; $I = 7{,}5$ А. **8.15.** $I_{пр} = 80$ А; $I_ш = 48$ А. **8.16.** $r_ш = 0{,}0025$ Ом. **8.17.** $I = 20$ мА. **8.18.** $r_A = 4$ Ом; $\Delta I_{max} = 1{,}5$ А; $\beta_1 = 7{,}5\%$; $\beta_2 = 5\%$; $\beta_3 = 3\%$; $\beta_4 = 2\%$; $\beta_5 = 1{,}87\%$. **8.19.** $r_ш = 0{,}0025$ Ом; цена деления 0,5 мВ/дел; 0,2 А/дел. **8.20.** $r_{ш1} = 0{,}03$ Ом; $r_{ш2} = 0{,}015$ Ом; $I_{пр\,2} = 5$ А. **8.21.** $r_{доб} = 29{,}7$ кОм. **8.22.** $r_в = 150$ Ом; $I = 5$ мА; $r_{доб\,2} = 2850$ Ом; $r_{доб\,3} = 14\,850$ Ом; $r_{доб\,4} = 29\,850$ Ом. **8.23.** $r_{доб} = 120$ кОм; $P_1 = 3$ Вт; $P_2 = 15$ Вт. **8.24.** $r_{доб} = 15{,}8$ кОм. **8.25.** $U_1 = 245$ В; $U_2 = 105$ В, $\Delta U_{max} = \pm 2{,}25$ В, $\beta = 0{,}64\%$. **8.27.** $R_x = 30$ Ом; $R'_x = 30{,}2$ Ом. **8.28.** $R_x = 48$ Ом; $\Delta R_{max} = 1{,}3$ Ом; $\beta = 2{,}7\%$. **8.29.** Не хуже 0,5. **8.30.** 1) $\beta_a = 0{,}01$; $\beta_б = 0{,}5$. **8.31.** $R_x = 17{,}5$ кОм; $\Delta R_{max} = \pm 7{,}8$ кОм; $\beta = 44{,}5\%$, класс точности 0,5. **8.32.** $Z_к = 25{,}4$ Ом; $R_к = 4{,}9$ Ом; $X_к = 25{,}1$ Ом; $\beta_R = 2{,}4\%$; $\beta_Z = 2{,}75\%$. **8.33.** $R_к = 4$ Ом; $X_к = 6{,}95$ Ом; $R_{кmax} = 4{,}15$ Ом; $R_{кmin} = 3{,}85$ Ом; $\beta_R = 4\%$;

$X_{кmax} = 7{,}3$ Ом; $X_{кmin} = 6{,}6$ Ом; $\beta_x = 5\%$. **8.34.** $R_x = 13{,}6$ Ом; $\Delta R = 0{,}41$ Ом. **8.35.** $R_x = 2{,}6387$ Ом. **8.36.** $l = 238{,}4$ м. **8.37.** $R2 = 950$ Ом; $R7 = 60$ Ом; $R8 = 40$ Ом; $R5 = 100$ Ом; $R6 = 0$. **8.38.** $P_x = 60$ Вт; $P_н = 462$ Вт; $\cos\varphi_x = 0{,}3$; $\cos\varphi_н = 0{,}7$. **8.39.** $P_2 = 202$ Вт. **8.40.** $P_1 = P_2 = 202$ Вт; $Q_1 = 116$ вар; $Q_2 = -116$ вар. **8.41.** $P = 905$ Вт; $Q = 920$ вар; $S = 1294$ В·А; $Z_A = 53{,}8$ Ом; $Z_B = 35{,}5$ Ом; $X_C = 21{,}5$ Ом; $Z_C = 30{,}2$ Ом; $R_A = 37{,}6$ Ом; $R_B = 24{,}8$ Ом; $R_C = 21{,}1$ Ом; $X_A = 39$ Ом; $X_B = 25{,}3$ Ом. **8.42.** а) $\beta_a \approx 0{,}01\%$; $\beta_б = 0{,}5\%$; б) $\beta_W = 1{,}43\%$. **8.43.** $P = 125$ кВт; $\beta = 0{,}6\%$. **8.44.** $P = 49{,}5$ кВт; $Q = 26{,}3$ квар; $S = 56{,}2$ кВ·А; $\cos\varphi = 0{,}882$; $I = 72$ А; $U = 780$ В. **8.45.** $I = 3{,}5$ А; $U = 50$ В; $P_C = 180$ кВт; $\cos\varphi = 0{,}86$; $\beta_1 = 0{,}7\%$; $\beta_U = 1\%$; $\beta_P = 1{,}25\%$. **8.46.** $I = 210$ А; $U = 3{,}6$ кВ; $P = 480$ кВт; $Q = 584$ квар; $S = 756$ кВ·А; $Z = 17{,}1$ Ом; $R = 10{,}9$ Ом; $X = 13{,}3$ Ом. **8.47.** $C_{ном} = 5760$ Вт·с/об; $P_н = 4{,}3$ кВт. **8.48.** $C_{ном} = 2812$ Вт·с/об; $C = 2640$ Вт·с/об; $\beta = 6{,}45\%$; $K = 0{,}94$. **8.49.** $W = 55{,}7 \cdot 10^3$ кВт·ч; $I = 4{,}7$ А. **8.50.** $R_д = 5524$ Ом, цена деления $C = 6$ град/дел. **8.51.** $\Theta_{max} = 770°$ С, $\Theta_{max} - \Theta_{20} = 750°$ С, цена деления $C = 7{,}5$ град/дел.

Глава 9

9.13. $\tau = 0{,}5$ м. **9.14.** $\Phi = 0{,}025$ Вб. **9.15.** $N = 800$; $Z = 40$. **9.16.** $E = 200$ В. **9.17.** $E = 100$ В. **9.18.** $\Phi = 0{,}05$ Вб. **9.19.** $n = 1000$ об/мин. **9.20.** $C_E = 4{,}13$. **9.21.** $E_1 = 208{,}8$; $E_2 = 410{,}4$ В. **9.22.** $E = 249{,}4$ В. **9.23.** $E = 215{,}76$ В. **9.24.** $n = 1482$ об/мин. **9.25.** $P = 6$. **9.26.** $C_E = 12$; $\Phi = 0{,}0234$ Вб. **9.27.** $N = 212$. **9.28.** $E_1 = 500$ В. **9.29.** Уменьшится в 2 раза. **9.30.** $U = 114{,}9$ В. **9.31.** $U = 115$ В. **9.32.** $E = 118{,}2$ В; $I_я = 80$ А. **9.33.** $R = 38$ Ом. **9.34.** $I_я = 33$ А; $I_в = 8$ А. **9.35.** $I_я = 102{,}5$ А; $P_2 = 11\,500$ Вт. **9.36.** $E = 120$ В; $P_{эя} = 532{,}5$ Вт; $P_{эв} = 368$ Вт; $P_{эм} = 12\,400$ Вт; $\Delta U = 5$ В. **9.37.** $R_я = 0{,}66$ Ом. **9.38.** $E = 127{,}45$ В; $R_в = 76{,}6$ Ом; $U_2 = 109{,}45$ В. **9.39.** $n = 2857$ об/мин. **9.40.** $U = 133{,}6$ В. **9.41.** $U = 451{,}5$ В. **9.42.** $U = 120$ В. **9.43.** $P = 13800$ Вт. **9.44.** $I_я = 80$ А. **9.45.** $P_{эм} = 26\,400$ Вт. **9.46.** $P_я = 0{,}049$ Ом. **9.47.** $I_я = 102{,}3$ А; $U = 99{,}5$ В; $I_в = 2{,}76$ А; $I_{ном} = 99{,}54$ А; $P_2 = 9904$ Вт. **9.48.** $I_в = 10{,}45$ А; $I_{ном} = 434{,}8$ А; $I_я = 445{,}25$ А; $E = 119$ В; $P_{эя} = 1700$ Вт; $P_{эв} = 1200$ Вт. **9.49.** $I_я = 38{,}77$ А; $E = 117{,}87$ А; $P_{эм} = 4570$ Вт; $P_{ном} = 4191$ Вт. **9.50.** $I_я = 123$ А; $E = 118$ В; $\eta = 91\%$; $M = 51$ Н·м. **9.51.** $R_я = 0{,}7$ Ом; $R_{ном} = 11$ Ом; $E = 234$ В; $P_2 = 4400$ Вт. **9.52.** $I_в = 3$ А; $R_в = 76{,}6$ Ом; $I_я = 63{,}87$ А; $E = 238{,}8$ В; $R_я = 0{,}137$ Ом. **9.53.** $I_я = 238{,}3$ А; $I_в = 20{,}9$ А; $E = 232$ В; $P_{эя} = 567{,}8$ Вт; $P_{эв} = 4805$ Вт; $P_м + P_{мх} = 2098$ Вт. **9.54.** $n = 2820$ об/мин. **9.55.** $I_я = 125$ А; $I_{ном} = 121$ А; $E = 119{,}7$ В; $R_я = 0{,}0376$ Ом; $R_в = 28{,}75$ Ом; **9.56.** $U = 115$ В; $P = 7475$ Вт. **9.57.** $E = 212$ В. **9.58.** $U = 110$ В. **9.59.** $E = 218$ В. **9.60.** $I_я = 20$ А. **9.61.** $I_п = 45$ А. **9.62.** $I_я = 12{,}5$ А. **9.63.** $R_{реост} = 10{,}5$ Ом. **9.64.** $R_{реост} = 5$ Ом. **9.65.** $I_п = 550$ А; $R_{реост} = 4$ Ом; **9.66.** $R_{реост} = 1{,}69$ Ом. **9.67.** $R_я = 0{,}32$ Ом; $I_п = 687{,}5$ А. **9.68.** $R_я = 1$ Ом. **9.69.** $R_{рег} = 80$ Ом. **9.70.** $\eta = 0{,}75$. **9.71.** $P_э = 162$ Вт. **9.72.** $P_э = 168$ В. **9.73.** $P_э = 162$ Вт. **9.74.** $P_2 = 5953$ Вт. **9.75.** $P_1 = 605$ Вт. **9.76.** $I = 43{,}3$ В; $I_я = 41{,}3$ А; $I_в = 2$ А; $I_я = 2200$ А; $R_{реост} = 2{,}56$ А; $R_{эя} = 170$ Вт; $R_{эв} = 440$ Вт; $P_м + P_{мх} = 913$ Вт; $M = 25{,}4$ Нм. **9.77.** $I_в = 0{,}8$ А; $I_я = 25$ А; $P_{эв} = 87$ Вт; $P_{эя} = 125$ Вт; $E = 105$ В; $P_{эм} = 2625$ Вт. **9.78.** $I_в = 2{,}2$ А; $I_я = 10$ А;

$P_{эв}=484$ Вт; $P_{эв}=100$ Вт; $E=210$ В. **9.79.** $R_д=0{,}018$ Ом; $P_2=63\,000$ Вт; $\sum P=7000$ Вт. **9.80.** $P_м+P_{мх}=440$ Вт; $P_2=2247$ Вт; $\eta=0{,}785$. **9.81.** $I_х=6{,}1$ А. **9.82.** $P_{эм\,ном}$ в 3,7 раза больше $P_{эмх}$. **9.83.** $P_г+P_{вг}=453{,}6$ Вт. **9.84.** $M=86{,}2$ Н·м. **9.85.** $M=75$ Н·м. **9.86.** $M=230$ Н·м. **9.87.** $M=60$ Н·м. **9.88.** $Ф=0{,}04$ Вб. **9.89.** $M=2069$ Н·м; $n_х=612$ об/мин. **9.90.** $\eta=0{,}8$; $M=15{,}9$ Н·м. **9.91.** $E=200$ В; $M=63{,}6$ Н·м; $n=3003$ об/мин. **9.92.** $n_х=1650$ об/мин. **9.93.** $n_х=1040$ об/мин. **9.94.** $СФ=0{,}146$ Вб. **9.95.** $n_х=1582$ об/мин; $M=203{,}7$ Н·м. **9.96.** $R_д=0{,}6$ Ом. **9.97.** $P_{эм}=21\,000$ Вт; $P_2=19\,530$ Вт. **9.98.** $I_к=60{,}5$ А; $R_д=0{,}18$ Ом; $P_2=11\,088$ Вт; $M=141{,}2$ Н·м. **9.99.** $n=1225$ об/мин. **9.100.** $E=205$ В; $P_{эм}=20\,500$ Вт; $M=130$ Н·м; $n=1485$ об/мин. **9.101.** $n=1496$ об/мин; $n_х=1556$ об/мин. **9.102.** $n=940$ об/мин; $M=143$ Н·м. **9.103.** $P_1=7040$ Вт; $\eta=0{,}852$; $M=57{,}3$ Н·м. **9.104.** $M=9{,}8$ Н·м. **9.105.** $E=104{,}8$ В; $n=1002$ об/мин. **9.106.** $E=211$ В; $n=1507$ об/мин. **9.107.** Для П32. $P_1=5357$ Вт; $\sum P=857$ Вт; $P_э=262{,}4$ Вт; $P_м+P_{мх}=594{,}5$ Вт; $P_{эм}=5079{,}6$ Вт; $M=14{,}3$ Н·м; $n_х=3088$ об/мин; $R_п=3{,}4$ Ом. **9.108.** $n=0{,}84$. **9.109.** $P_1=35\,200$ Вт; $P_2=30\,272$ Вт. **9.110.** $P_1=28\,409$ Вт; $P_{эм}=27\,963$ Вт; $P_э=416$ Вт; $E=216{,}77$ В. **9.111.** $P_1=21\,692$ Вт; $\eta=0{,}875$; $M=60{,}54$ Н·м. **9.112.** $E=103{,}28$ В. $P_2=2200$ Вт; $\eta=0{,}833$. **9.113.** $M=318{,}3$ Н·м; $\eta=0{,}835$. **9.114.** $Ф=0{,}078$ Вб; $\Delta U=15$ В; $I=300$ А. **9.115.** $E=213$ В; $R_д=0{,}07$ Ом; $M=203{,}5$ Н·м. **9.116.** $P_2=75\,000$ Вт; $P_1=83\,800$ Вт; $I_д=380{,}9$ А; $P_{эв}=2900$ Вт; $E=212{,}4$ В. **9.117.** $\frac{P_1'}{P_2}=\frac{19\,800}{13\,200}=1{,}5$; $\frac{P_2'}{P_2}=\frac{16\,963}{1100}=1{,}54$; $\frac{I'}{I}=\frac{90}{60}=1{,}5$; $\frac{\eta'}{\eta}=\frac{0{,}666}{0{,}785}=0{,}846$. **9.118.** $I=340{,}9$ А; $E=213$ В; $P_2=67125$ Вт; $M=427{,}3$ Н·м. **9.119.** $I_д=167$ А; $E=208{,}8$ В; $Ф=0{,}047$ Вб; $P_{эм}=34\,870$ Вт; $M_{эм}=345$ Н·м; $P_2=33\,300$ Вт; $M=330$ Н·м; $\eta=0{,}88$. **9.120.** $n=1124$ об/мин. **9.121.** При $Ф_{ном}$ $n_х=1047$ об/мин; при $Ф_{1\,их}=n_{х'}=2095$ об/мин; $n_{ном}=1910$ об/мин. **9.122.** $M_1=0$; $n_1=2500$ об/мин; $M_2=60$ Н·м; $n_2=2600$ об/мин; $M_3=0$; $n_3=5000$ об/мин; $M_4=30$ Н·м; $n_4=3000$ об/мин.

Глава 10

10.5. $s=4\%$. **10.6.** $s_{ном}=8{,}5\%$. **10.7.** $w=314$ рад/с. **10.8.** 4. **10.9.** $p=3$. **10.10.** $s=0{,}033$; $f_2=1{,}66$ Гц. **10.11.** $s_{ном}=0{,}033$. **10.12.** $s=0{,}0866$. **10.13.** $n=940\div999$ об/мин. **10.14.** $n_1=1000$ об/мин. **10.15.** $n_2=2880$ об/мин. **10.16.** $n=930\div996$ об/мин. **10.17.** $p=2$; $s=0{,}04$. **10.18.** $E_1=376{,}5$ В; $E_2=47$ В; $E_{2s}=2{,}82$ В. **10.19.** $E_1=215.6$ В; $E_2=3{,}59$ В; $E_{2s}=0{,}14$ В. **10.20.** $E_1=217{,}8$ В; $E_2=33{,}7$ В; $E_{2s}=1{,}348$ В. **10.21.** $E_1=217{,}3$ В; $E_2=108{,}7$ В; $E_{2s}=6{,}5$ В. **10.22.** $E_{2\,\Delta/Y}=152$ В; $E_{2s}=6$ В; $E_{2Y/Y}=88$ В; $E'_{2s}=3{,}52$ В. **10.23.** $E_1=377$ В; $E_2=254$ В; $E_{2s}=10{,}1$ В. **10.24.** $w=260$. **10.25.** $E_1=383{,}6$ В; $E_2=32$ В; $E_{2s}=1{,}2$ В. **10.26.** $E_{2s}=2{,}2$ В; $f_2=2{,}5$ Гц. **10.27.** $E_1=217$ В; $E_2=44$ В; $E_{2s}=1{,}45$ В. **10.28.** $E_1=215$ В; $E_2=27$ В; $E_{2s}=0{,}89$ В. **10.29.** $E_1=655{,}3$ В; $E_2=97$ В; $E_{2s}=3{,}9$ В. **10.30.** $X_{L2}=0{,}058$ Ом. **10.31.** $I_{2н}=16{,}25$ А; $I_{2s}=13{,}78$ А.

10.32. $X_{L2}=15$ Ом. **10.33.** $\eta=0{,}88$. **10.34.** $\sum P=1{,}88$ Вт. **10.35.** $\eta=0{,}824$; $\cos\varphi=0{,}69$. **10.36.** $\eta=0{,}785$; $\cos\varphi=0{,}69$. **10.37.** $\cos\varphi=0{,}81$; $\eta=0{,}8$. **10.38.** $\cos\varphi=0{,}7$; $\eta=0{,}845$. **10.39.** $s=0{,}043$; $\eta=0{,}91$. **10.40.** $P_1=67{,}8$ кВт; $s=3{,}83\%$; $M=993$ Н·м; $I_{1\Delta}=231{,}4$ А; $I_{1\curlywedge}=134$ А. **10.41.** $\eta=0{,}926$. **10.42.** $s=0{,}04$; $P_2=4$ кВт; $\eta=0{,}83$. **10.43.** $I_1=45{,}8$ А; $P_1=47065$ Вт. **10.44.** $I_{2н}=111{,}8$ А; $I_{2s}=4{,}47$ А. **10.45.** $P_{эм}=17{,}3$ кВт; $P_2=16{,}8$ кВт; $P_{э2}=2{,}3$ кВт. **10.46.** $S=40\,540$ В·А; $P_1=34\,883$ Вт; $M_{ном}=395$ Н·м; $s_{ном}=0{,}033$; $s_{кр}=0{,}19$. **10.47.** $p=2$; $s=0{,}033$; $I_\Delta=96{,}3$ А; $I_Y=32{,}1$ А. **10.48.** $M_4=63{,}6$ Н·м; $M_6=95{,}5$ Н·м; $M_8=127{,}3$ Н·м. **10.49.** $P_2=40\,020$ Вт; $\eta=0{,}85$; $s=0{,}02$. **10.50.** $\cos\varphi=0{,}9$; $n_2=970$ об/мин; $P_2=7110$ Вт; $\eta=0{,}948$. **10.51.** $M_{ном}=709$ Н·м; $I_{ном}=100{,}6$ А; $I_{фп}=200{,}6$ А; $I_{лп}=503$ А. **10.52.** $n_2=727{,}5$ об/мин; $P_2=5523$ Вт; $\cos\varphi=0{,}72$; $\eta=0{,}85$. **10.53.** $n_2=970$ об/мин; $P_2=5{,}0$ кВт; $\cos\varphi=0{,}68$; $\eta=74{,}5\%$. **10.54.** $P_1=26$ кВт; $I_{1\Delta}=97{,}7$ А; $I_{1Y}=56{,}6$ А; $M=290{,}6$ Н·м; $s=0{,}036$. **10.55.** $P_1=52\,325$ Вт; $I_{1Y}=107{,}56$ А; $I_{1\Delta}=185{,}8$ А; $M_{ном}=748{,}7$ Н·м; $s=0{,}043$. **10.56.** $p=4$; $s=0{,}12$; $I_{п\Delta}=149{,}5$ А; $I_{п\curlywedge}=86{,}4$ А; $M_{ном}=108{,}5$ Н·м; $P_1=10563$ Вт. **10.57.** $s_{кр}=21{,}66\%$; $n_{кр}=783{,}4$ об/мин, $M_{ном}=218{,}8$ Н·м; $M_{max}=612{,}8$ Н·м. **10.58.** Для двигателя АО2-52-2. $p=1$; $n_1=3000$ об/мин; $s_{ном}=0{,}033$; $p=14772$ Вт; $M_{ном}=42{,}8$ Н·м; $M_{max}=94{,}2$ Н·м; $M_п=51{,}3$ Н·м; $I_{ном}=24{,}86$ А; $I_п=124{,}3$ А. При номинальном напряжении пуск возможен, при пониженном нет. **10.59.** $P_1=33\,898$ Вт; $I_\curlywedge=35$ А; $I_\Delta=60{,}5$ А; $I_{\curlywedge п}=227{,}3$ А; $I_{\Delta п}=393$ А; $M_{ном}=195{,}5$ Н·м; $M_п=449{,}8$ Н·м; $M_{max}=625{,}8$ Н·м. **10.60.** Для двигателя ВАО42-2. $P_1=8772$ Вт; $p=1$; $s_{ном}=0{,}033$; $s_{кр}=0{,}2$; $M_{ном}=24{,}7$ Н·м; $M_{пуск}=39{,}5$ Н·м; $M_{max}=54{,}3$ Н·м; $I_п=59{,}5/106{,}4$ А; $n_{кр}=2400$ об/мин. **10.61.** Для двигателя ЭДКОФ-33/4. $I_{Y/\Delta}=35/60{,}5$ А; $I_{пY/\Delta}=227{,}3/393{,}3$ А; $M_{ном}=195{,}5$ Н·м; $M_п=449{,}8$ Н·м; $M_{max}=625{,}8$ Н·м; $\sum P=3898$ Вт; $f_2=14{,}5$ Гц. **10.62.** $P_1=4678$ Вт; $I=13{,}8$ А; $\sum P=678$ Вт; $M=13{,}2$ Н·м; $s=0{,}04$. **10.63.** $P_2=40\,000$ Вт; $\eta=0{,}91$; $I_1=73$ А; $n_1=1000$ об/мин; $n_2=980$ об/мин. **10.64.** $P_1=2716$ Вт; $P_2=2200$ Вт; $\sum P=516$ Вт; $M=22{,}15$ Н·м; $n_1=1000$ об/мин. **10.65.** $P_2=4{,}0$ кВт; $\sum P=0{,}82$ кВт; $\eta=83\%$; $I_1=13{,}27$ А; $s=4\%$; $f_2=2$ Гц. **10.66.** $P_1=857$ Вт; $P_2=600$ Вт; $\sum P=257$ Вт; $M=6{,}26$ Н·м; $n_2=915$ об/мин; $f_2=4{,}25\%$. **10.67.** $I_1=3$ А; $\eta=76\%$; $s=7\%$; $n_1=1000$ об/мин; $n_2=930$ об/мин. **10.68.** $\sum P=1428$ Вт; $I_1=21{,}5$ А; $f_2=1{,}65$ Гц. **10.69.** $\eta=90{,}5\%$; $I_{1ном}=81{,}6$ А; $f_2=1{,}25$ Гц. **10.70.** $I_1=41{,}0$ А; $\eta=90{,}5\%$; $f_2=1{,}5$ Гц. **10.71.** $M=649{,}6$ Н·м; $f_2=1$ Гц. **10.72.** $\sum P=1120$ Вт; $M=73{,}8$ Н·м; $p=3$; $s=3\%$. **10.73.** $\sum P=1770$ Вт; $M=128$ Н·м. **10.74.** $P_1=2650$ Вт; $P_2=2200$ Вт; $\sum P=450$ Вт; $I_1=4{,}5$ А; $n_1=3000$ об/мин; $s=4{,}66\%$. **10.75.** $P_1=1382$ Вт; $\eta=79{,}5\%$; $\cos\varphi=0{,}82$; $M=3{,}73$ Н·м; $s=6{,}2\%$; $n_1=3000$ об/мин. **10.76.** $\sum P=1294$ Вт; $s=4\%$; $M=68{,}6$ Н·м. **10.77.** $I_1=13{,}6$ А; $\eta=85\%$; $s=3\%$. **10.78.** $R_п=0{,}11$ Ом. **10.79.** $R_п=0{,}16$ Ом. **10.80.** $R_п=0{,}56$ Ом. **10.81.** $R_п=0{,}44$ Ом. **10.82.** $R_п=0{,}4$ Ом. **10.83.** $n_2=600$ об/мин. **10.84.** 48. **10.85.** $n_1=187{,}5$ об/мин. **10.86.** $f=400$ Гц. **10.87.** $p=44$. **10.88.** $E=230$ В. **10.89.** $w_1=96$. **10.90.** $P_2=12{,}6$ кВт. **10.91.** $E_к=401$ В. **10.92.** $\eta=94{,}3\%$. **10.93.** $P_1=666{,}6$ кВт. **10.94.** $I_{ном}=190$ А; $M=318$ Н·м. **10.95.** $P_1=450$ кВт; $\sum P=37$ кВт;

$I = 45{,}8$ А. **10.96.** $I_Y = 132{,}7$ А; $I_\Delta = 230$ А. **10.97.** $n = 750$ об/мин; $M_{ном} = 955$ Н·м; $I = 132$ А; $P_1 = 78{,}1$ кВт. **10.98.** $P_{эм} = 282{,}4$ кВт; $P_э = 32{,}4$ кВт. **10.99.** $p = 32$; $M = 50\,906\,183$ Н·м; $I = 21\,984$ А. **10.100.** $P_1 = 913\,440$ Вт; $E_1 = 10\,400$ В.

Глава 11

11.9. $M = 17{,}5$ Н·м; $P_{мх} = 1285$ Вт; двигатель АО2-41-8. **11.10.** $P_{мх} = 9000$ Вт; мощность двигателя $P_{ном} = 11{,}0$ кВт. **11.11.** Двигатель марки АО2-11-4. **11.12.** Двигатель марки АО2-32-2. **11.13.** Двигатель марки АК-72-8. **11.14.** $P_{мх} = 16$ кВт; двигатель марки АО2-72-8. **11.15.** $mD^2 = 3{,}28$ кг·м^2; $M = 292{,}3$ Н·м. **11.16.** $P_{мх} = 34\,700$ Вт; двигатель марки ДП-52; $P_{ном} = 38\,000$ Вт; $n_{ном} = 850$ об/мин; $U = 220$ В. **11.17.** $i = 72{,}5$. Двигатель марки АО2-72-8. **11.18.** Двигатель марки П92; $P_{ном} = 25\,000$ Вт; $n_{ном} = 600$ об/мин. **11.19.** Двигатель марки АОЛ2-51-8; $P_{ном} = 4000$ Вт; $n_{ном} = 725$ об/мин. **11.20.** Двигатель марки МТК-42-8; $P_{ном} = 16\,000$ Вт. **11.21.** Двигатель марки АО2-42-4; $P_{ном} = 5500$ Вт. **11.22.** $M_{эк} = 5$ Н·м; $P_{эк} = 788$ Вт; двигатель марки АО2-12-4. **11.23.** Двигатель марки АО2-51-4; $P_{ном} = 7500$ Вт. **11.24.** $P_{ном} = 3000$ кВт. **11.25.** Двигатель марки АО2-71-8; $P_{ном} = 13\,000$ Вт; $n_{ном} = 725$ об/мин; $P_{мх} = 11\,368$ Вт. **11.26.** Двигатель марки МТ-52-8; $P_{ном} = 30\,000$ Вт; при ПВ = 25% $n_{ном} = 725$ об/мин. **11.27.** $P_{40\%} = 8696$ Вт; $P_{60\%} = 7100$ Вт. **11.28.** Двигатель марки П72; $P_{ном} = 25\,000$ Вт; $n_{ном} = 1500$ об/мин; $P_{эк} = 20\,500$ Вт. **11.29.** $P_{15\%} = 4518$ Вт; $P_{40\%} = 2767$ Вт; $P_{60\%} = 2260$ Вт.

Глава 12

12.2. $s = 25$ мм^2. **12.3.** $P = 48$ кВт; $I = 106$ А; $s = 25$ мм^2. **12.4.** $s_{1ф} = 1423{,}7$ мм^2; $s_{3ф} = 1067{,}8$ мм^2; 25%. **12.5.** $s = 95$ мм^2; $s_п = 400$ мм^2. **12.6.** $s = 35$ мм^2; $U_1 = 400$ В; $P_г = 2$%. **12.7.** $s = 16$ мм^2; $I_п = 60$ А; $I_{1п} = 20$ А; $I_{2п} = 35$ А; $I_{3п} = 15$ А; $I_{4п} = 15$ А; $t = 0{,}015$ с. **12.8.** $I = 125$ А; $s = 150$ мм^2; $\Delta U = 13$ В; $\Delta P = 180$ Вт; $\eta = 99{,}9$%; $I_{чет} = 125$ А; $s_{min} = 207$ мм^2. **12.9.** $I = 346$ А; $s_U = 137$ мм^2; $s_I = 50$ мм^2; $s_{min} = 134$ мм^2; $I_{уст} = 600$ А; $I_{ном\,расц} = 350$ А. **12.10.** $I = 181$ А; $s_U = 28{,}4$ мм^2; $s_I = 26$ мм^2; $s_{min} = 61$ мм^2; $I_{уст} = 300$ А; $I_{ном\,расц} = 200$ А.

Раздел второй

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

Глава 13

13.5. $J = 675$ мА/см^2. **13.6.** $T = 1500$ К. **13.7.** $\omega_0 = 2{,}5 \cdot 10^{-29}$ Дж. **13.8.** $H = 15{,}9$ мА/Вт. **13.9.** $I_е = 125{,}7$ мА. **13.10.** $I_а = 126$ мА. **13.11.** $P_а = 3{,}12$ Вт. **13.12.** $I_а = 20$ мА. **13.13.** $I_а = 2{,}7$ мА. **13.19.** $P_а = 0{,}19$ Вт. **13.20.** $I_а = 17$ мА; $U_а = 5$ В. **13.23.** $\Delta I_а = 60$ мА. **13.24.** $\Delta U_а = 5$ В. **13.25.** $\Delta I_а = 5$ мА. **13.26.** $\Delta U_а = 4$ В. **13.27.** $P_а = 0{,}47$ Вт. **13.28.** $P_а = 0{,}11$ Вт. **13.29.** $I_а = 50$ мА, $U_а = 100$ В. **13.30.** $R_{02}/R_{01} = 4$. **13.31.** $P_{02} > P_{01}$. **13.34.** $\Delta I_а = 6{,}5$ мА. **13.35.** $\Delta I_а = 6$ мА.

13.36. $\Delta U_а = 215$ В. **13.38.** $\Delta U_с = -1{,}8$ В. **13.45.** $S = 4$ мСм. **13.46.** $S = 4$ мСм, $R_i = 20$ кОм, $\mu = 80$. **13.53.** $P_а = 0{,}4$ Вт. **13.54.** $U_а = 40$ В. **13.56.** $S = 4$ мСм, $R_i = 15$ кОм, $\mu = 75$. **13.57.** Увеличится на $\Delta I_а = 8$ мА. **13.58.** Увеличится на $\Delta I_а = 12$ мА. **13.59.** Не изменится.

Глава 14

14.9. $U_{вх\,min} = 156$ В, $U_{вх\,max} = 267$ В. **14.10.** $R_{огр} = 5{,}8$ кОм. **14.11.** $R_{огр} = 2$ кОм. **14.18.** $U_С = -2$ В. **14.19.** $U_а = 0{,}05$ кВ. **14.20.** Не будет.

Глава 15

15.6. $R_i = 11$ Ом, $S = 90$ мСм. **15.11.** $S = 6{,}75$ мСм, $R_i = 148$ Ом. **15.12.** $\Delta I_{пр} = 60$ мА. **15.13.** $\Delta I_{пр} = 5{,}5$ мА. **15.16.** $\Delta R_{i\,пр} = 300$ Ом. **15.17.** $U_{ст} = 20 \div 24$ В. **15.18.** Параллельно. **15.19.** Последовательно. **15.20.** $R_{обр} = 1{,}5$ МОм. **15.22.** $h_{21б} = 0{,}91 \div 0{,}99$. **15.23.** $h_{21э} = 20 \div 50$. **15.24.** В схеме с общей базой. **15.32.** $U_К = 10$ В, $P_К = 315$ мВт > $> P_{К\,доп} = 225$ мВт. **15.33.** $h_{21э} = 32$. **15.35.** $R_{вх} = 1$ Ом. **15.38.** $h_{21э} = 28$. **15.39.** $R_{вх} = 6{,}7$ Ом. **15.40.** т. А ($I_{КО} = 8$ мА, $I_{БО} = 200$ мкА). **15.41.** т. А ($U_К = 4$ В, $I_{БО} = 350$ мкА). **15.42.** $I_К = 14{,}9 \div 34{,}9$ мА. **15.43.** т. А ($I_{КО} = 19$ мА, $I_{ЭО} = 20$ мА, $U_К = 7{,}8$ В). **15.44.** $P_К = 150$ мВт.

Глава 16

16.2. $K_ф = 4500$ мкА/лм. **16.3.** $I_ф = 300$ мкА.

Глава 17

17.4. Правильно. **17.5.** $U_О = 100$ В. **17.6.** $U_О = 80$ В. **17.7.** Можно. **17.8.** $f_г = 800$ Гц. **17.9.** $U_О = 108$ В. **17.10.** $U_О = 150$ В. **17.11.** $U_{нп} = 86$ В. **17.12.** $f_с = 1$ кГц. **17.13.** $U_О = 191$ В. **17.14.** $I_О = 142$ мА. **17.15.** $U_2 = 71{,}6$ В. **17.16.** $U_{обр} = 533{,}8$ В. **17.17.** $q = 20$. **17.18.** $C_ф = 40$ мкФ. **17.19.** $L_ф = 9{,}6$ Гн. **17.20.** $L_ф = 12$ Гн, $C_ф = 21$ мкФ.

Глава 18

18.7. $K_О = 14$ дБ. **18.8.** $K_2 = 25$ дБ. **18.9.** $K = 60$ дБ. **18.10.** $K = 6000$ (75,5 дБ). **18.11.** $U_{вых} = 5$ В. **18.12.** $K_р = 100$ (20 дБ). **18.13.** $K_О = 10$. **18.14.** $P_{вых} = 10$ мВт. **18.15.** $K = 281$ (49 дБ). **18.16.** $U_{вх\,1} = 2$ мВ, $U_{вх\,2} = 0{,}2$ В. **18.18.** $K_2 = 5$ (14 дБ). **18.19.** $M_н = 1{,}73$ (4,8 дБ). **18.20.** $U_{вых\,в} = 5$ В. **18.21.** $U_{вых\,в} = 2{,}61$ В. **18.22.** $M_н = 1{,}23$ (1,8 дБ), $M_в = 1{,}45$ (3,2 дБ). **18.23.** $M_н = 1{,}1$ (0,8 дБ), $M_в = 1{,}39$ (2,9 дБ). **18.24.** $M_в = 1{,}26$ (2 дБ). **18.25.** т. A ($I_{БО} = 417$ мкА, $I_{КО} = 12$ мА, $U_К = 6$ В). **18.26.** $R_Б = 20$ кОм, $R_К = 390$ Ом. **18.27.** т. A ($I_{КО} = 21$ мА, $U_К = 7$ В, $I_{БО} = 600$ мкА). **18.28.** $R_Б = 15$ кОм. **18.29.** $R_Б = 40$ кОм. **18.32.** $R1 = 38$ кОм, $R2 = 2$ кОм. **18.33.** $U_Б = 0{,}22$ В. **18.34.** т. A ($I_{БО} = 700$ мкА, $I_{КО} = 27$ мА, $U_К = 4{,}5$ В). **18.35.** Т. A ($I_{БО} = 600$ мкА, $U_Б = 0{,}32$ В). **18.36.** $E_С = -4{,}5$ В. **18.37.** $U_Б = 0{,}72$ В. **18.45.** $K_О = 172$. **18.46.** $R_О = 33$ кОм. **18.47.** $K_Ф = 30$. **18.48.** $R_i = 8{,}35$ кОм. **18.49.** $S =$

$=12$ мСм. **18.50.** $K_0=26{,}5$. **18.51.** $h_{21Э}=42{,}6$. **18.53.** $P_н=0{,}3$ Вт. **18.54.** $P_0=5{,}5$ Вт. **18.55.** $R'_н=400$ Ом. **18.56.** $n=0{,}08$. **18.57.** $K^*_0=25$. **18.58.** $K_{ос}=0{,}0033$. **18.60.** $K^*=75$. **18.61.** $K_i=20$. **18.66.** $Q=100$.

Глава 19

19.5. $f_0=205$ кГц. **19.6.** $K_{св}=0{,}42$. **19.7.** $f_0=596$ кГц. **19.8.** $C4=282$ пФ, $C2=141$ пФ. **19.9.** $T\approx1{,}4$ мс. **19.10.** $T\approx2{,}2$ мс. **19.11.** $f_c=3{,}5$ кГц. **19.12.** $R_{Б1}=1{,}4$ кОм. **19.13.** $\tau_н=18$ мкс. **19.14.** $R_{Б1}=R_{Б2}=16$ кОм, $C_{Б1}=C_{Б2}=0{,}015$ мкФ. **19.15.** $\tau_н=105$ мкс. **19.16.** $h_т=0{,}3$ мм/В. **19.18.** $l=50$ мм. **19.23.** $f_c=50$ Гц. **19.24.** $f_в=2$ кГц.

Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники (электроцепи). М., 1996.

Глазенко Т.А., Прянишников В.А. Электротехника и основы электроники. М., 1996.

Демкович В.П. Сборник задач по физике. М., 1979.

Справочник по полупроводниковым диодам, транзисторам и интегральным схемам / Под ред. Н.Н. Горюнова. М., 1979.

Харченко В.М. Основы электроники. М., 1982.

Электротехнический справочник (в 3-х т.). М., 1985—1987.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3

Раздел первый

ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА 4

Глава 1. Электрическое поле 4
Глава 2. Электрические цепи постоянного тока 23
Глава 3. Электромагнетизм 44
Глава 4. Основные понятия о переменном токе 71
Глава 5. Однофазные электрические цепи 84
Глава 6. Трехфазные электрические цепи 127
Глава 7. Трансформаторы 149
Глава 8. Электротехнические измерения и приборы 181
Глава 9. Электрические машины постоянного тока 199
Глава 10. Электрические машины переменного тока 236
Глава 11. Электропривод и аппаратура управления 269
Глава 12. Передача и распределение электрической энергии 283

Раздел второй

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ 293

Глава 13. Электронные лампы 293
Глава 14. Газоразрядные приборы 307
Глава 15. Полупроводниковые приборы 310
Глава 16. Фотоэлектронные приборы и интегральные схемы микроэлектроники 321
Глава 17. Электронные выпрямители 323
Глава 18. Электронные усилители 329
Глава 19. Электронные измерительные приборы и электронные генераторы 347
Приложения 358
Ответы к задачам 365
Литература 379

Учебное издание

Березкина Тамара Филипповна, **Гусев** Николай Григорьевич, **Масленников** Вячеслав Васильевич

ЗАДАЧНИК ПО ОБЩЕЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ С ОСНОВАМИ ЭЛЕКТРОНИКИ

Редактор *Т.Ф. Мельшкова*
Художественный редактор *Ю.Э. Иванова*
Технический редактор *В.М. Романова*
Корректор *Г.И. Кострикова*

ЛР № 010146 от 25.12.96. Изд. № СТР-178.
Сдано в набор и подп. в печать 30.10.2000. Формат 60×88/16.
Бум. газетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
Объем 23,52 усл. печ. л. 23,77 усл. кр-отт. 18,43 уч.-изд.л.
Тираж 10000 экз. Заказ №187

ГУП «Издательство «Высшая школа», 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14.

Факс: 200-03-01, 200-06-87
E-mail: V-Shkola@g23.relcom.ru http: // www.v-shkola.ru

Отпечатано в ОАО «Оригинал», 101898, Москва, Центр, Хохловский пер., 7.