

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Кузбасский государственный технический
университет имени Т. Ф. Горбачева»

Кафедра общей электротехники

Составители: Т. М. Черникова, И. П. Маслов, В.А. Андреев

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Методические указания к лабораторным работам

Рекомендованы ЦМК специальности 18.02.12 «Технология аналитического
контроля химических соединений» в качестве электронного издания
для использования в образовательном процессе

Кемерово 2022

Рецензенты:

Дабаров В. В. – к.т.н., доцент кафедры общей электротехники;

Ченская В.В. – доцент, к.х.н., председатель ЦМК специальности 18.02.12 «Технология аналитического контроля химических соединений».

Черникова Татьяна Макаровна, Маслов Иван Петрович, Андреев Виктор Александрович. Электротехника и электроника: методические указания к лабораторным работам для обучающихся специальности 18.02.12 Технология аналитического контроля химических соединений, очной формы обучения / сост.: Т. М. Черникова, И. П. Маслов, В.А. Андреев; Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева. – Кемерово, 2022. – Текст: электронный.

Приведено содержание лабораторных работ, материал, необходимый для успешного изучения дисциплины.

Назначение издания – помощь студентам в получении знаний по дисциплине «Электротехника и электроника».

© Кузбасский государственный
технический университет имени
Т. Ф. Горбачева, 2022

© Т. М. Черникова, И. П. Маслов,
В. А. Андреев
составление 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ТЕМА 1. Электрические цепи постоянно тока.	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1. Исследование резистивных цепей. Установление зависимости величин напряжения и силы тока. Закон Ома ...	8
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2. Обоснование второго закона Кирхгофа. Последовательное соединение резисторов.....	10
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3. Обоснование первого закона Кирхгофа на примере параллельного соединения приемников.....	13
ТЕМА 2. Электромагнетизм.....	19
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4. Исследование магнитного поля и свойств магнита	24
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5. Исследование электромагнетизма вокруг прямого проводника и катушки с током.....	28
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6. Исследование электромагнитной индукции	29
ТЕМА 3 Электрические цепи переменного тока.	31
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7. Исследование параметров цепей переменного тока. Постоянные и переменные напряжения. Параметры синусоидальных сигналов. Среднеквадратичные величины напряжения и тока.....	39
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 8. Исследование индуктивности в цепях переменного тока.....	47
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 9. Исследование емкости в цепях переменного тока. Определение емкости по фазовому сдвигу между напряжением на конденсаторе и напряжением питания.....	53
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	61

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Электротехника и электроника» состоит из лекционных и лабораторных занятий. Выполнение лабораторных работ по электротехнике позволяет закрепить на практике знания, полученные при изучении теоретического материала. Лабораторные работы проводятся на специально оборудованных стендах и компьютерах в предназначенной для этого аудитории. На вводном занятии преподаватель проводит инструктаж по технике безопасности. Каждый студент обязан расписаться в журнале проведения инструктажа и, таким образом, подтвердить, что он ознакомлен и согласен с правилами.

Методические указания содержат краткие теоретические положения, охватывающие основные разделы теоретического курса: линейные цепи постоянного тока, электромагнетизм, линейные цепи переменного тока. Методические указания рассчитаны на студентов, уже проработавших соответствующие разделы курса.

ТЕМА 1. Электрические цепи постоянно тока

Основные теоретические положения

1. Электрические цепи состоят из источников и потребителей электрической энергии. Потребитель электрической энергии характеризуется сопротивлением, которое является параметром цепи и обозначается буквой R (резистор).

2. Источник электрической энергии, характеризуемый внешней характеристикой $U=f(I)$ (рис. Т1.1,а), может быть представлен в виде любой из двух эквивалентных схем: схемы из последовательного включения ЭДС и внутреннего (входного) сопротивления источника (рис. Т1.1,б) и схемы из параллельно включенных источников тока и внутреннего (входного) сопротивления источника (рис. Т1.1,б). Величина ЭДС E в схеме (рис. Т1.1,б) численно равна напряжению на зажимах источника в режиме холостого хода (при отключенной нагрузке), а ток источника J_k в схеме (рис. Т1.1,в) численно равен току короткого замыкания источника.

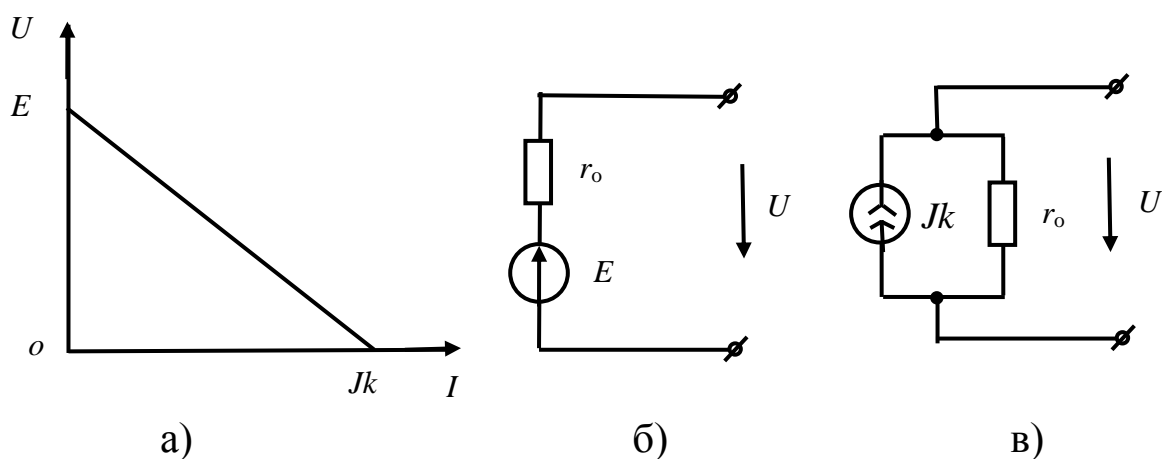


Рис. Т1.1

3. Переход от схемы с источником ЭДС к схеме с источником тока и обратно осуществляется по формулам

$$J_k = \frac{E}{r_0}; \quad E = r_0 \cdot J_k.$$

4. При расчетах электрических цепей пользуются понятиями идеализированных источников: источников ЭДС и источников тока. У источника ЭДС внутреннее сопротивление $r_0=0$, а у источника тока $r_0=\infty$. Напряжение на зажимах источника ЭДС не зависит от проходящего через источник тока и равно его ЭДС, а у источника тока ток не зависит от напряжения на зажимах источника.

5. Имеется три формы записи закона Ома.

Для замкнутой неразветвленной цепи

$$I = \frac{\sum E}{\sum R},$$

где $\sum E$ – алгебраическая сумма ЭДС; со знаком «+» в эту сумму входят те ЭДС, направления действия которых совпадают с выбранным положительным направлением тока и со знаком «-» – остальные ЭДС; $\sum R$ – арифметическая сумма сопротивлений цепи (в том числе внутренних сопротивлений источников ЭДС).

Для отдельной ветви без источника ЭДС в сложной электрической цепи

$$I_{ab} = \frac{\varphi_a - \varphi_b}{R_{ab}} = \frac{U_{ab}}{R_{ab}},$$

где φ_a, φ_b – потенциалы узлов; U_{ab} – разность потенциалов или напряжение между узлами a и b ; R_{ab} – арифметическая сумма сопротивлений в данной ветви (см. рис. Т1.2).

Для ветви с источниками ЭДС

$$I_1 = \frac{\varphi_a - \varphi_c + \Sigma E_{ac}}{\Sigma R_{ac}} = \frac{U_{ac} + \Sigma E_{ac}}{\Sigma R_{ac}},$$

где $U_{ac} = \varphi_a - \varphi_c$ – напряжение или разность потенциалов узлов, к которым подключена ветвь; ΣE_{ac} – алгебраическая сумма ЭДС в ветви « ac »; ΣR_{ac} – арифметическая сумма сопротивлений в ней.

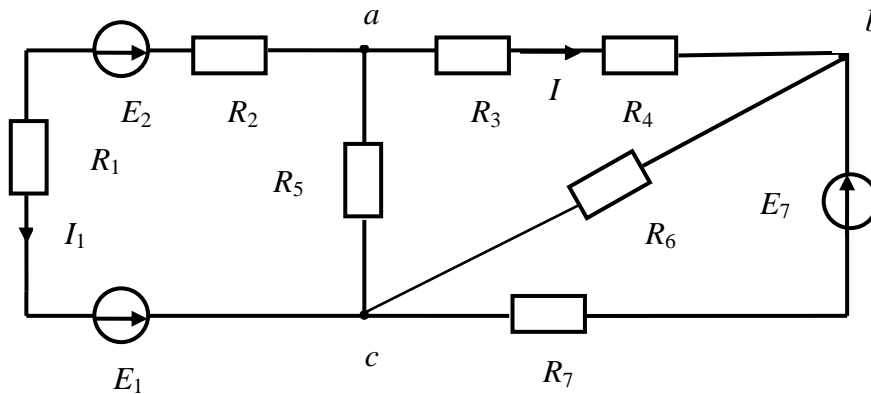


Рис. Т1.2

Для ветви ac (см. рис. Т1.2)

$$\Sigma E_{ac} = E_1 - E_2;$$

$$\Sigma R_{ac} = R_1 + R_2.$$

6. Первый закон Кирхгофа. Алгебраическая сумма токов, сходящихся в любом узле электрической цепи, равна нулю:

$$\Sigma I = 0.$$

Токи, подходящие к узлу, берутся с одним знаком (обычно с плюсом), отходящие от узла – с другим знаком.

7. Второй закон Кирхгофа. В любом (замкнутом) контуре электрической цепи алгебраическая сумма падений напряжения (на сопротивлениях) равна алгебраической сумме ЭДС:

$$\Sigma IR = \Sigma E.$$

8. Определение эквивалентных сопротивлений в пассивных цепях:

а) при параллельном соединении n сопротивлений эквивалентное сопротивление определяется по формуле

$$\frac{1}{R_{\text{э}}} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}.$$

В частом случае параллельного соединения двух сопротивлений

$$R_{\text{э}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$$

При параллельном соединении трех сопротивлений

$$R_{\text{э}} = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3};$$

б) преобразование треугольника сопротивлений (рис. Т1.3,а) в эквивалентную звезду и наоборот (рис. 1.3,б) производится по формулам

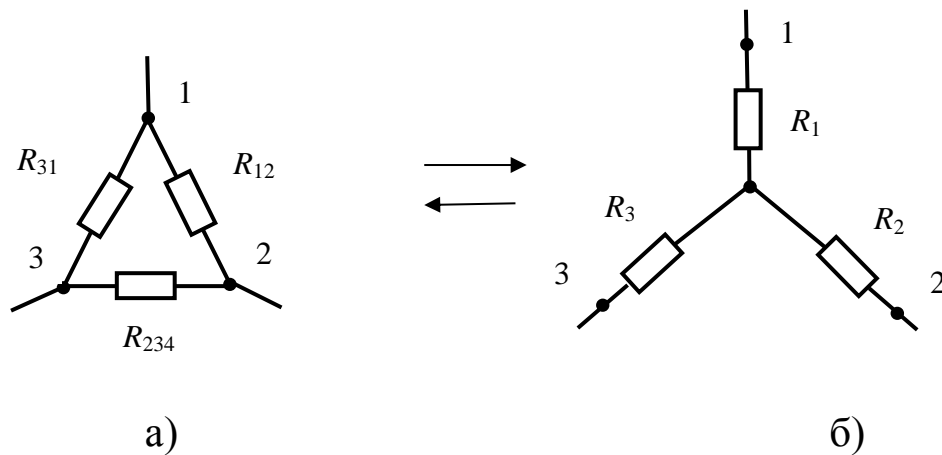


Рис. Т1.3

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \frac{R_{31} R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \\ R_2 &= \frac{R_{12} R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \\ R_3 &= \frac{R_{23} R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \end{aligned} \right\} \Delta \rightarrow Y \quad \left. \begin{aligned} R_{12} &= R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R_3} \\ R_{23} &= R_2 + R_3 + \frac{R_2 R_3}{R_1} \\ R_{31} &= R_3 + R_1 + \frac{R_3 R_1}{R_2} \end{aligned} \right\} Y \rightarrow \Delta$$

9. При определении токов в разветвленных цепях (рис. Т1.4) полезно пользоваться формулой разброса токов в параллельных ветвях

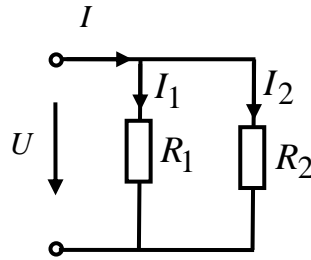


Рис. Т1.4

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot I; \quad I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot I$$

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1

Исследование резистивных цепей. Установление зависимости величин Напряжения и силы тока. Закон Ома

Цель: изучение и закрепление закона Ома, применение его для расчета простейших цепей постоянного тока.

Задача 1.1.

Как изменится сила тока, протекающая по проводнику, если его диаметр уменьшить в 2 раза? Поясните свой ответ.

Решение.

Сопротивление проводника зависит от его диаметра:

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{4\rho l}{\pi d^2}.$$

В соответствии с законом Ома вначале ток равен

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{U S_1}{\rho l} = \frac{U \pi d_1^2}{4\rho l}.$$

Так как диаметр уменьшили в 2 раза, следовательно, площадь поперечного сечения стала равна

$$S_2 = \frac{\pi d_2^2}{4} = \frac{\pi \left(\frac{d_1}{2}\right)^2}{4} = \frac{\pi d_1^2}{16}.$$

Ток после уменьшения диаметра

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{U S_2}{\rho l} = \frac{U \pi d_2^2}{4 \rho l} = \frac{U \pi d_1^2}{16 \rho l}.$$

Получаем: $\frac{I_2}{I_1} = \frac{1}{4}.$

Ответ: ток уменьшился в 4 раза.

Задача 1.2.

Определить ток лампы на 110 В, мощностью 60 Вт, подключенной к батарее 120 В. Внутреннее сопротивление батареи 60 Ом. Будет ли лампа гореть полным накалом?

Решение.

Ток лампы определим по закону Ома для полной цепи:

$$I = \frac{E}{r + R},$$

где $E = 120$ В – э.д.с. батареи; $r = 60$ Ом – внутреннее сопротивление батареи, R – сопротивление лампы.

Определим сопротивление лампы

$$R = \frac{U^2}{P},$$

где $U = 110$ В – напряжение лампы; $P = 60$ Вт – мощность лампы.

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{110^2}{60} = 201,66 \text{ Ом}.$$

Ток лампы

$$I = \frac{E}{r + R} = \frac{120}{60 + 201,66} = 0,458 \text{ А}.$$

Для полного накала ток лампы должен быть

$$I_n = \frac{P}{U} = \frac{60}{110} = 0,545 \text{ А}.$$

Так как ток лампы $I = 0,458$ А ниже тока, необходимого для полного накала лампы $I_n = 0,545$ А, полным накалом лампа гореть не будет.

Задача 1.3.

Определить показания амперметра $I_{изм}$ пределом измерения 5А и количеством делений на шкале 100, если стрелка прибора отклонилась до деления 45.

Ответ: 2,25 А.

Задача 1.4.

Определить напряжение на зажимах электрической машины, работающей в режиме генератора при токе 25 А. ЭДС машины 115 В, внутреннее сопротивление $r_0 = 0,2$ Ом.

Ответ: 110 В.

Контрольные вопросы:

1. В чем отличие источника тока от источника напряжения?
2. Назовите единицы измерения тока, напряжения, ЭДС, сопротивления.
3. Сформулируйте закон Ома для полной цепи.
4. Сформулируйте закон Ома для участка цепи.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2

Обоснование второго закона Кирхгофа.

Последовательное соединение резисторов

Цель: изучение и закрепление законов Кирхгофа; применение их для расчета простейших цепей постоянного тока.

Задача 2.1.

Ток при небольшом отклонении измерительного механизма магнитоэлектрической системы 10 А, внутреннее сопротивление механизма 20 Ом. Можно ли на основе данного измерительного механизма создать вольтметр с номинальным напряжением $U_V = 3$ В.

Решение.

Последовательность операций расчета:

1. Вспомнить основные свойства последовательной цепи.
2. Привести электрическую схему последовательной цепи (рис.2.1).

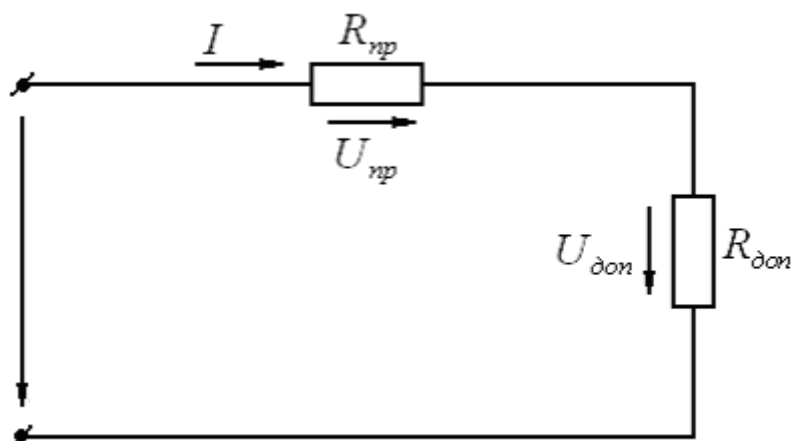


Рис. 2.1

Для решения поставленной задачи достаточно включить последовательно с измерительным механизмом прибора резистор сопротивлением $R_{доп} = 280 \text{ Ом}$, тогда ток, протекающий через измерительный механизм с сопротивлением $R_{np} = 20 \text{ Ом}$, не будет превышать 10 А . Падение напряжения на приборе будет: $U_{np} = I \cdot R_{np} = 0,2 \text{ В}$, а на дополнительном резисторе $U_{доп} = U - U_{np} = 3 - 0,2 = 2,8 \text{ В}$.

Таким образом, данный измерительный механизм можно использовать для измерения напряжения до трех вольт.

Задача 2.2.

Напряжение источника питания 120 В . Рассчитать цепь, обеспечивающую регулирование напряжения приемника в диапазоне $12\text{--}30 \text{ В}$, если сопротивление приемника равно 1 кОм .

Решение.

Последовательность операций расчета:

1. Вспомнить пропорциональность изменения напряжения.
2. Привести электрическую схему последовательной цепи (рис.2.2), где U_{12} – напряжение на клеммах источника, U_n – регулируемое напряжение на приемнике, R_p – сопротивление регулировочного реостата.

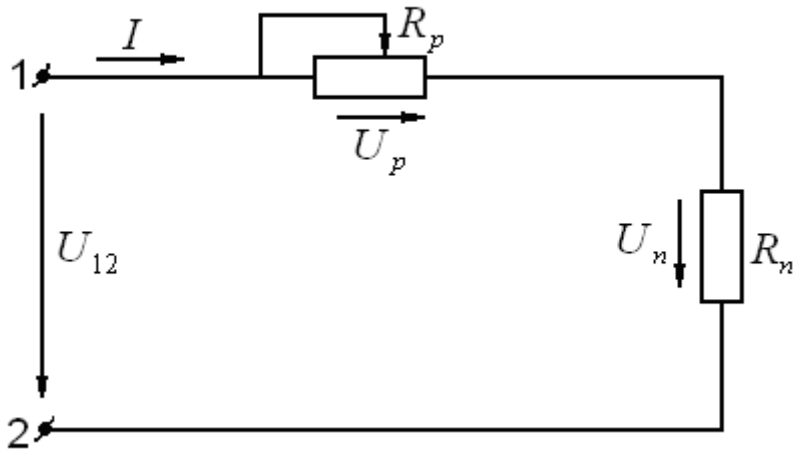


Рис. 2.2

3. При крайне правом положении движка сопротивление регулировочного реостата равно нулю, напряжение источника 120 В равно напряжению приемника. В крайнем левом положении движка сопротивление реостата максимальное, а напряжение на приемнике равно 30 В . Таким образом, изменяя сопротивление реостата от нуля до максимального значения, обеспечим регулирование напряжения от 120 до 30 В .

Составим пропорцию:

$$\frac{U_n}{U_{12}} = \frac{R_n}{R_p + R_n} \quad R_p = \frac{R_n(1 - \frac{U_n}{U_{12}})}{\frac{U_n}{U_{12}}} = 3\text{ кОм}.$$

Ответ: сопротивление регулировочного реостата должно быть не менее 3 кОм .

Задача 2.3.

Три резистора сопротивлением R каждый соединены последовательно. Параллельно одному из них подключили резистор сопротивлением $R/2$. Как изменится общее сопротивление всей цепи?

Ответ: $\frac{R_2}{R_1} = \frac{7}{9}$.

Задача 2.4.

Вольтметр на 150 В , с внутренним сопротивлением 3000 Ом требуется включить в цепь постоянного тока с напряжением 450

В. Нарисовать схему включения и определить добавочное сопротивление.

Ответ: 6000 Ом.

Контрольные вопросы:

1. Сформулируйте второй закон Кирхгофа.
2. Чему равно эквивалентное сопротивление при последовательном включении элементов?
3. Чему равно общее напряжение при последовательно включенных элементах?
4. Чему равен ток при последовательном соединении элементов?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3

Обоснование первого закона Кирхгофа на примере параллельного соединения приемников

Цель: изучение и закрепление первого закона Кирхгофа; применение его для расчета простейших цепей постоянного тока.

Задача 3.1.

Подобрать такое число ламп n в цепи якоря, чтобы протекал номинальный ток 10 А. Напряжение на зажимах генератора при номинальной нагрузке 220 В. Сопротивление одной лампы 440 Ом.

Последовательность операций расчета:

1. Если сопротивление приемников, включенных параллельно, одинаковое, то общее сопротивление лампового реостата будет в n раз меньше сопротивления одного приемника.
2. Привести электрическую схему (рис. 3.1)

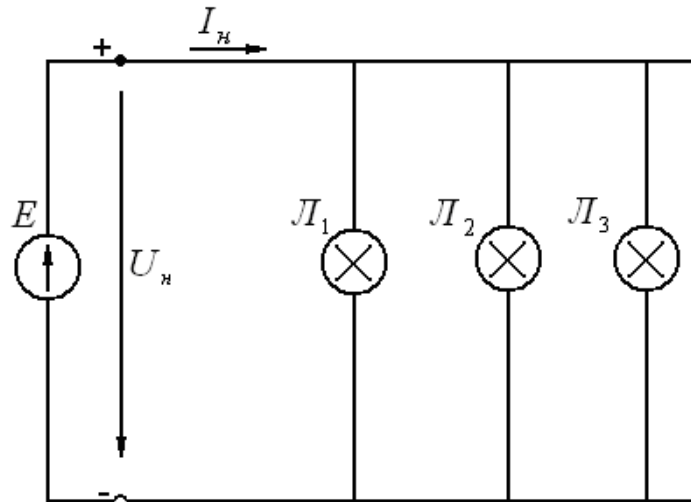


Рис. 3.1

Решение:

$$1) R_{\Sigma} = \frac{U_n}{I_n} = \frac{220}{10} = 22 \text{ Ом}$$

$$2) \text{Число включенных ламп } n = \frac{R_L}{R_{\Sigma}} = \frac{440}{22} = 20 \text{ шт, т.к.}$$

$$R_1 = R_2 = \dots = R_n$$

Ответ: чтобы протекал номинальный ток якоря, необходимо включить параллельно 20 ламп.

Задача 3.2.

Напряжение линии электропередачи 1,5 кВ. Сопротивление изоляции проводов относительно земли 20 кОм. Определить величину тока прошедшего через тело человека, прикоснувшегося к проводу, если электрическое сопротивление тела принять равным 1 кОм.

Последовательность операций расчета:

1. Мощность электрической цепи не изменится, если смешанное соединение резистивных элементов заменить одним эквивалентным сопротивлением, т.е. использовать прием свертывания электрической схемы.

2. Привести электрическую схему линии электропередачи (рис. 3.2), обозначив провода за «А», «В» и сопротивления изоляции провода относительно земли R_{uA} , R_{uB} .

3. Указать: при прикосновении человека ($R_{чел}$), например, к проводу «А», его тело будет параллельно сопротивлению изоляции провода «А» и ток, протекающий через тело человека, будет обратно пропорционален его сопротивлению.

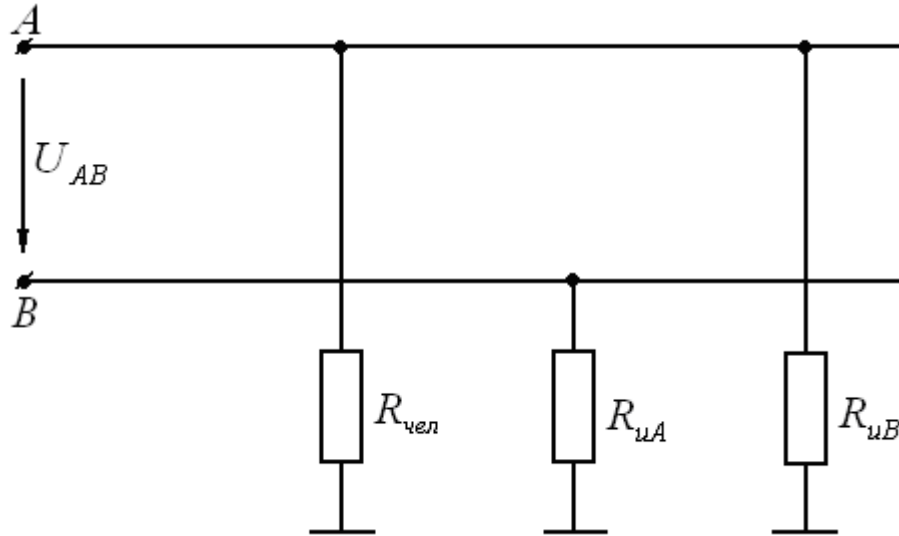


Рис. 3.2

Решение:

Представим электрическую схему в более наглядной форме (рис. 3.3).

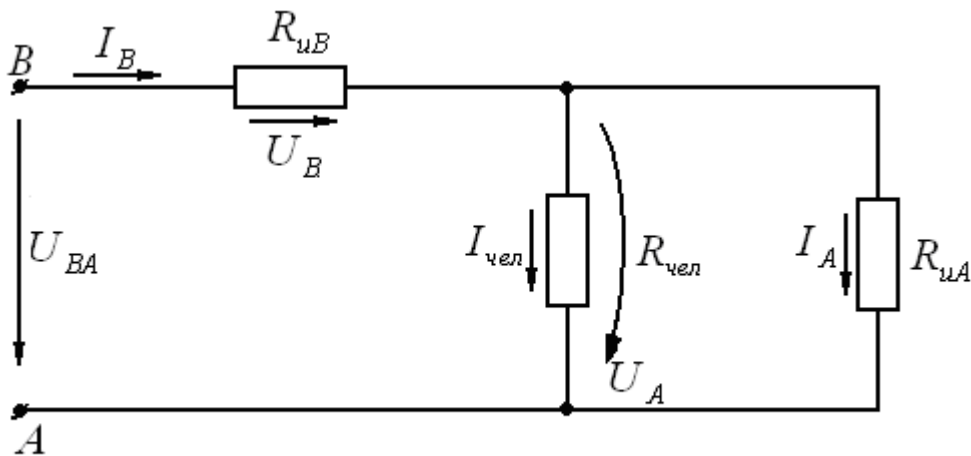


Рис. 3.3

1. Эквивалентное сопротивление

$$R_{\Sigma} = R_{uB} + \frac{R_{uA} \cdot R_{чел}}{R_{uA} + R_{чел}} = 20,95 \text{ кОм.}$$

2. Ток, протекающий через изоляцию провода «B»

$$I_B = \frac{U_{BA}}{R_{\mathcal{E}}} = 71,4 \text{ мА.}$$

3. Напряжение между проводом «В» и землей

$$U_B = I_B \cdot R_{uB} = 1430 \text{ В.}$$

4. Напряжение между проводом «А» и землей или напряжение между телом человека и землей

$$U_{чел} = U_{BA} - U_B = 70 \text{ В.}$$

5. Ток, протекающий через тело человека, равен

$$I_{чел} = \frac{U_{чел}}{R_{чел}} = 70 \text{ мА.}$$

Ответ: ток, протекающий через тело человека, равен 70 мА.

Задача 3.3.

Подобрать балластное сопротивление ($R_{\mathcal{G}}$) в цепи, представленной на рис. 3.4, если ключ «К» замкнут. Обсудить следующие вопросы:

1. Как повлияет на работу ламп замыкание ключа «К»?
2. Как зависят режимы работы ламп от сопротивления подводящих проводов?
3. Как изменятся токи и напряжения на лампах, если убрать балластное сопротивление?

Исходные данные:

Напряжение источника электрической энергии $U_{12}=220 \text{ В}$, номинальное напряжение ламп $U_{л1}, U_{л2}, U_{л3}$ равно 110 В, а номинальная мощность каждой лампы по 10 Вт.

Последовательность операций расчета:

1. Балластное сопротивление необходимо определять из условия, что ключ «К» замкнут, то есть параллельно включены три лампы.
2. Привести электрическую схему (рис. 3.4).
3. В общем виде рассмотреть ответы на поставленные вопросы.

Решение:

- 1) Падение напряжений на балластном сопротивлении

$$U_{\delta} = U_{12} - U_{34} = 220 - 110 = 110 \text{ В.}$$

2) Общий ток $I = I_1 + I_2 + I_3 = 0,27 \text{ А}$,

где $I_1 = I_2 = I_3 = \frac{P}{U_{\text{Л}}} = \frac{10}{110} = 0,09 \text{ А}$.

3) Сопротивление балластного резистора

$$R_{\delta} = \frac{U_{\delta}}{I} = \frac{110}{0,27} = 407,4 \text{ Ом.}$$

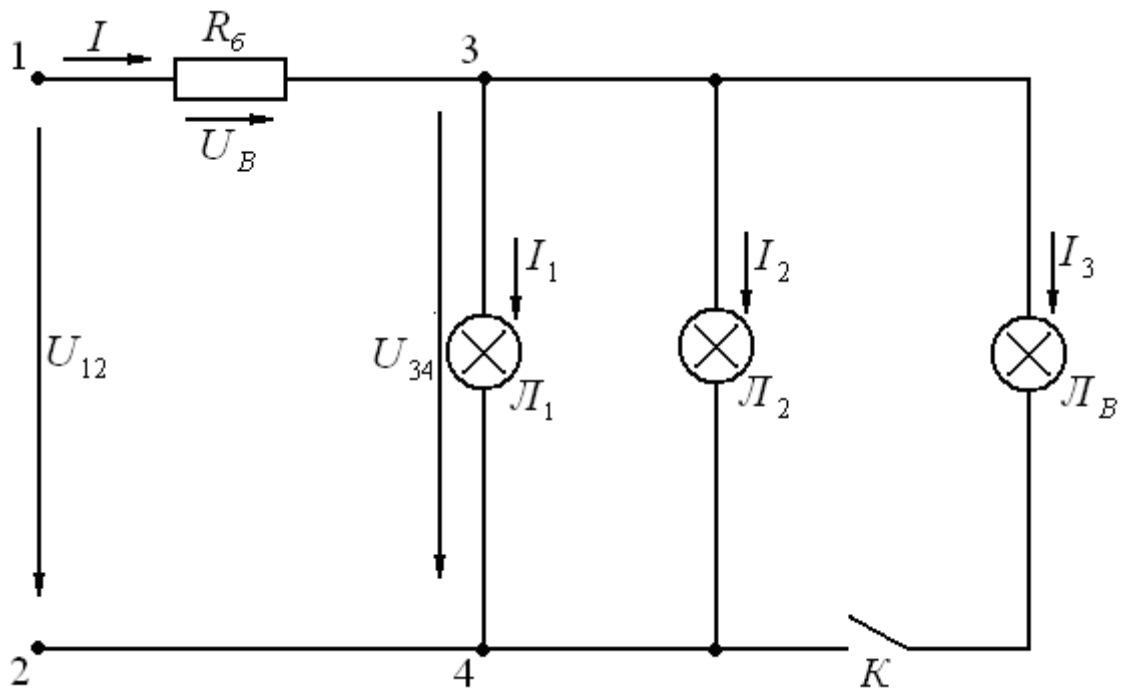


Рис. 3.4

4) Мощность балластного резистора

$$P_{\delta} = I^2 \cdot R_{\delta} = 0,27^2 \cdot 407,4 = 29,7 \text{ Вт.}$$

Задача 3.4.

В электрической цепи (рис.3.5) R_X – элемент, сопротивление которого требуется определить, $R_2 = 20 \text{ Ом}$, $R_3 = 50 \text{ Ом}$, $R_4 = 10 \text{ Ом}$.

Последовательность операций расчета:

1. Сопротивление можно подсчитать, исходя из равновесного состояния моста, которое выполняется следующим соотношением между сопротивлениями: $R_X \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$.

2. Привести электрическую схему (рис.3.5).

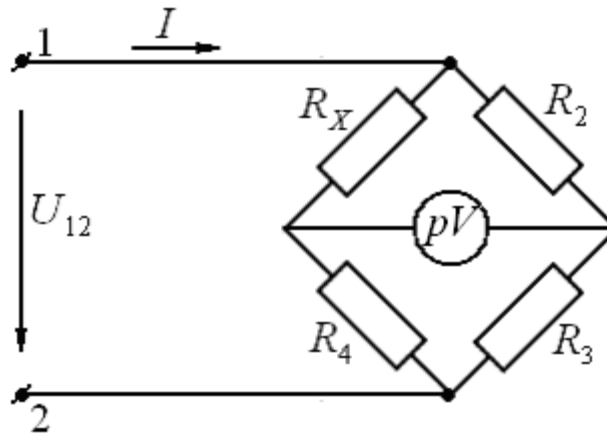


Рис. 3.5

Решение:

Исходя из условия равновесия моста, неизвестное сопротивление $R_X = \frac{R_2 \cdot R_4}{R_3} = \frac{20 \cdot 10}{50} = 4 \text{ Ом}$.

Задача 3.5

Сколько параллельно включенных электрических лампочек, рассчитанных на 100 В и потребляющих мощность 50 Вт каждая, могут гореть полным накалом при питании их от аккумуляторной батареи с ЭДС. 120 В и внутренним сопротивлением 10 Ом?

Ответ: 4 лампы.

Задача 3.6.

Определить показания вольтметра в цепи (рис. 3.6), если $J_k=3 \text{ А}$; $R_1=4 \text{ Ом}$; $R_2=1 \text{ Ом}$; $R_3=2 \text{ Ом}$; $R_4=8 \text{ Ом}$.

Ответ: 6 В.

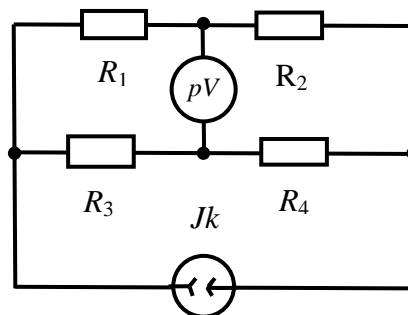


Рис. 3.6

Задача 3.7. В цепи (рис. 3.7) вольтметр показывает 8 В. Определить подведенное к цепи напряжение, если $R_1=R_2=R_5=8$ Ом; $R_3=12$ Ом; $R_4=7$ Ом.

Ответ: 116 В.

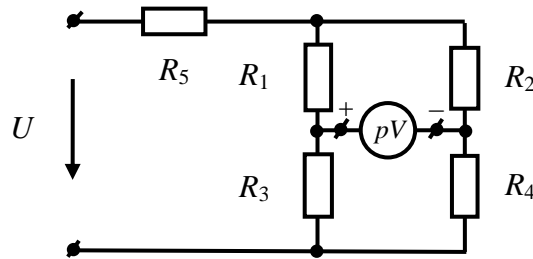


Рис. 3.7

Контрольные вопросы:

1. Сформулируйте первый закон Кирхгофа.
2. Чему равно эквивалентное сопротивление при параллельном соединении приемников?
3. Чему равно напряжение на параллельных ветвях?
4. Как определяются токи в ветвях при параллельном соединении сопротивлений?

ТЕМА 2 Электромагнетизм

Основные теоретические положения

1. Вокруг всякого намагниченного тела возникает магнитное поле. При внесении в магнитное поле какого-либо тела оно пронизывается магнитными линиями, которые определенным образом воздействуют на поле.

Материалы, атомы которых не имеют магнитного момента и намагнитить которые невозможно, называют диамагнитными. Материалы, атомы которых обладают некоторым магнитным моментом и могут намагничиваться, называют парамагнитными. Материалы, атомы которых обладают большим магнитным моментом и которые легко поддаются намагничиванию, называются ферромагнитными.

Вокруг проводника с током образуется магнитное поле, направление магнитных линий которого определяется правилом

буравчика: *если поступательное движение буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то вращательное движение его рукоятки указывает направление магнитных линий поля, образующегося вокруг проводника.*

Если проводник, по которому проходит электрический ток, внести в магнитное поле, то в результате взаимодействия магнитного поля и проводника с током проводник будет перемещаться в ту или иную сторону. Для определения направления движения проводника в магнитном поле пользуются правилом левой руки: *если расположить ладонь левой руки так, чтобы магнитные линии входили в неё, а вытянутые четыре пальца указывали направление тока в проводнике, то отогнутый под прямым углом большой палец укажет направление движения проводника*

2. Основной величиной, характеризующей интенсивность и направление магнитного поля, является вектор магнитной индукции B . Свойство тока возбуждать магнитное поле характеризуется магнитодвижущей силой (МДС), обозначаемой буквой F .

Магнитодвижущая сила катушки равна

$$F = Iw,$$

где I – ток в обмотке; w – число витков обмотки.

Магнитодвижущая сила, приходящаяся на единицу длины магнитной линии, называется напряженностью магнитного поля, обозначается H .

Для участка магнитной цепи магнитная индукция

$$B = \Phi/S,$$

где Φ – магнитный поток; S – поперечное сечение участка; магнитное напряжение

$$U_m = Hl = \Phi R_m,$$

где H – напряженность магнитного поля; l – средняя длина участка; магнитное сопротивление участка

$$R_m = l/\mu_r\mu_0S,$$

где μ_r – относительная магнитная проницаемость материала участка; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная постоянная, Гн/м.

Магнитная индукция и напряженность магнитного поля участка связаны соотношением

$$B = \mu_r\mu_0H.$$

Для воздуха и для воздушных зазоров $\mu_r = 1$, следовательно,

$$H = B/\mu_0 = 0,8 \cdot 10^6 \text{ В},$$

где H в амперах на метр, а B в теслах.

Если H измеряется в квадратных единицах, А/см, то

$$H = 0,8 \cdot 10^3 \text{ В}$$

Между величинами, характеризующими магнитные и электрические цепи, существует формальная аналогия (табл.Т2.1).

Таблица Т2.1

**Формальная аналогия между электрическими
и магнитными цепями**

Электрические цепи	Магнитные цепи
Ток I , А	Поток Φ , Вб
ЭДС E , В	МДС F , А
Сопротивление R , Ом	Магнитное сопротивление R_m 1/Гн
Проводимость g , См	Магнитная проводимость g_m , Гн
Напряжение U , В	Магнитное напряжение U_m , А

Эта формальная аналогия распространяется и на методы расчета магнитных цепей.

Первый закон Кирхгофа для магнитной цепи

$$\sum \Phi = 0$$

и второй

$$\sum F = \sum U_m = \sum Hl = \sum \Phi R_m.$$

В слабых полях $\mu_r \approx const$, следовательно, и $R_m \approx const$, поэтому магнитная цепь рассчитывается как линейная.

Для наглядности можно составить эквивалентную электрическую схему, при помощи которой выполняется расчет.

При расчете магнитных цепей при постоянных потоках зависимость между B и H для ферромагнитных участков задается кривой намагничивания (табл. Т2.2).

3. ЭДС электромагнитной индукции, наведенная в контуре, равна скорости уменьшения магнитного потока, пронизывающего контур.

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}.$$

Отношение потокосцепления самоиндукции к току контура или катушки при неизменной магнитной проницаемости среды постоянно и называется индуктивностью.

$$L = -\frac{\Psi_L}{I}.$$

Энергия магнитного поля

$$W_m = \frac{LI^2}{2} = \frac{\Psi I}{2}.$$

Явление индуцирования ЭДС в одной цепи при изменении тока другой цепи называется взаимной индукцией.

ЭДС взаимной индукции

$$e_2 = -\frac{d\Psi_{12}}{dt} = -M \frac{di_1}{dt},$$

где M – взаимная индуктивность, Ψ_{12} – потокосцепление взаимной индукции, i_1 – ток в первой цепи.

Таблица Т2.2

Кривые намагничивания сталей 1211, 1411,1512,1561

Марка стали, индукция	<i>H</i> , А/см																		
	0,	0,2	0,4	1	1,4	1,8	2,4	4	6	8	10	12	14	18	22	24	40	80	120
1211, <i>B</i> , Тл	0	0,03	0,11	0,53	0,73	0,90	1,10	1,23	1,32	1,38	1,42	1,45	1,48	1,54	1,57	1,59	1,64	1,75	1,83
1411, <i>B</i> , Тл	0	0,04	0,18	0,67	0,81	0,92	1,05	1,14	1,23	1,30	1,38	1,42	1,46	1,50	1,53	1,55	1,59	1,69	1,78
1512, <i>B</i> , Тл	0	0,11	0,35	0,73	0,87	0,96	1,06	1,16	1,25	1,32	1,37	1,40	1,44	1,48	1,50	1,51	1,57	1,68	1,78
1561, <i>B</i> , Тл	0	0,20	0,44	0,75	0,88	0,98	1,11	1,20	1,27	1,32	1,37	1,40	1,42	1,44	1,46	1,47	1,54	1,65	1,74

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4

Исследование магнитного поля и свойств магнита

Цель: изучение основных магнитных характеристик вещества, научиться рассчитывать магнитные цепи.

Задача 4.1.

Магнитная цепь, изображенная на рис. 4.1 выполнена из электротехнической стали 1211 и имеет следующие размеры: $l_1 = 60$ см; $l_2 = 20$ см; $l_{\text{в}} = 0,1$ см; $l_3 = 80$ см; $S_1 = S_2 = S_3 = 10$ см². Магнитные потоки в крайних стержнях $\Phi_1 = 0,25 \cdot 10^{-3}$ Вб и $\Phi_3 = 1,31 \cdot 10^{-3}$ Вб.

Найти МДС $F_1 = I_1 w_1$ и $F_3 = I_3 w_3$; указать направление токов обмотках.

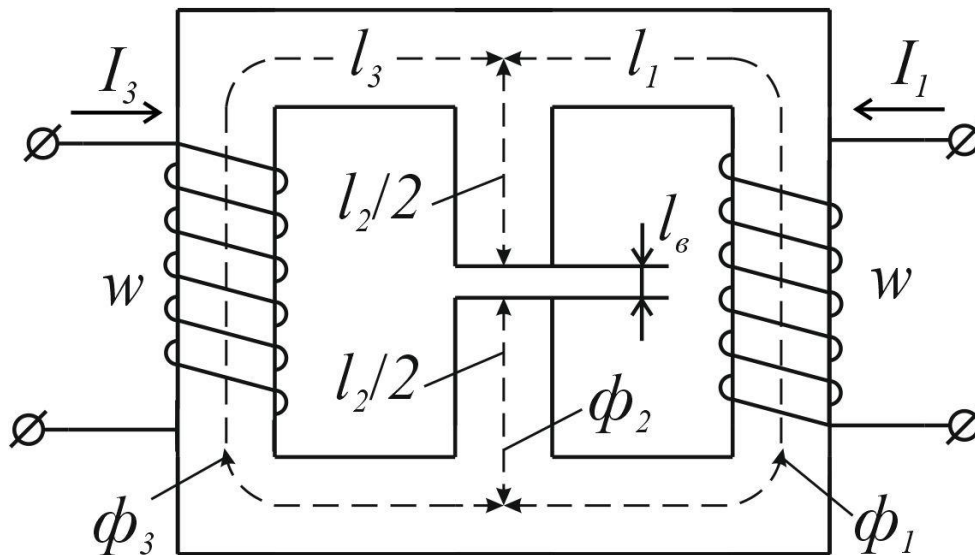


Рис. 4.1

Решение.

По первому закону Кирхгофа для магнитной цепи

$$\Phi_2 = \Phi_1 + \Phi_3 = 1,56 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.}$$

Индукция стержня

$$B_1 = \Phi_1 / S_1 = 0,25 \text{ Тл; } B_2 = \Phi_2 / S_2 = 1,56 \text{ Тл;}$$

$$B_3 = \Phi_3 / S_3 = 1,31 \text{ Тл.}$$

По кривой намагничивания для стали 1211 (см. табл. 2) находим: $H_1 = 0,6$ А/см; $H_2 = 20$ А/см; $H_3 = 6$ А/см.

По второму закону Кирхгофа определяем МДС:

$$F_1 = I_1 w_1 = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_{\text{в}} l_{\text{в}} \approx 1,56 \text{ А;}$$

$$F_3 = I_3 w_3 = H_3 l_3 + H_2 l_2 + H_B l_B \approx 2130 \text{ A.}$$

Задача 4.2.

Дана магнитная цепь из электротехнической стали, изображенная на рис. 4.2. Цепь состоит из трех однородных участков. Магнитный поток $\Phi = 43,2 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}$. Определить число витков катушки, если $X_1 = 6 \text{ см}$; $X_2 = 8 \text{ см}$; $X_3 = 20 \text{ см}$; $X_4 = 6 \text{ см}$; $X_5 = 6 \text{ см}$; $X_6 = 15 \text{ см}$; $X_7 = 6 \text{ см}$; $l = 0,5 \text{ см}$.

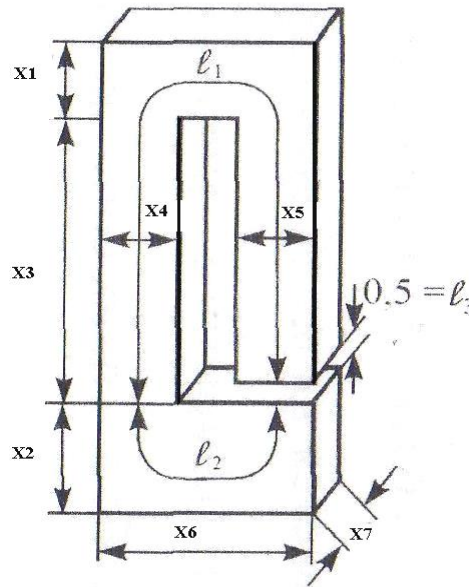


Рис.4.2

Решение.

1. Определяем площадь поперечного сечения каждого участка.

$$S_1 = X_4 \cdot X_7,$$

$$S_1 = X_4 \cdot X_7 = (6 \cdot 10^{-2}) \cdot (6 \cdot 10^{-2}) = 36 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2,$$

$$S_2 = X_2 \cdot X_7,$$

$$S_2 = X_2 \cdot X_7 = 8 \cdot 10^{-2} \cdot 6 \cdot 10^{-2} = 48 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2,$$

$$S_3 = S_1,$$

$$S_3 = S_1 = 36 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ (воздушный зазор).}$$

2. Определяем магнитную индукцию на каждом участке

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1}.$$

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1} = \frac{43,2 \cdot 10^{-4}}{36 \cdot 10^{-4}} = 1,2 \text{ Тл},$$

$$B_2 = \frac{\Phi}{S_2},$$

$$B_2 = \frac{\Phi}{S_2} = \frac{43,2 \cdot 10^{-4}}{48 \cdot 10^{-4}} = 0,9 \text{ Тл},$$

$$B_3 = \frac{\Phi}{S_3},$$

$$B_3 = \frac{\Phi}{S_3} = \frac{43,2 \cdot 10^{-4}}{36 \cdot 10^{-4}} = 1,2 \text{ Тл}.$$

3. По кривым намагничивания для листовой электротехнической стали определяем напряженность первого и второго участков: $H_1 = 1000 \text{ А/м}$; $H_2 = 500 \text{ А/м}$.

4. Напряженность в воздушном зазоре

$$H_3 = \frac{B_3}{\mu_0} = \frac{1,2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \approx 1 \cdot 10^6 \text{ А/м}.$$

5. Составляем уравнение по закону полного тока для магнитной цепи

$$IW = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3.$$

6. Определяем среднюю длину каждого участка

$$l_1 = 20 + 3 + 9 + 3 + 19,5 = 54,5 \text{ см} = 0,545 \text{ м};$$

$$l_2 = 4 + 9 + 4 = 17 \text{ см} = 0,17 \text{ м};$$

$$l_3 = 0,5 \text{ см} = 0,5 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

7. Определяем число витков

$$W = \frac{H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3}{I} = \frac{1000 \cdot 0,545 + 500 \cdot 0,17 + 1 \cdot 10^6 \cdot 0,5 \cdot 10^{-2}}{5} = 1126$$

Ответ. 1126 витков

Задача 4.3. В воздушном зазоре электромагнита, выполненного из стали 1411 (рис. 4.3), необходимо создать индукцию $B = 0,05 \text{ Тл}$.

Определить МДС, необходимую для создания магнитного потока с заданной индукцией, если $l_c + l_{\text{я}} = 100$ см, суммарный воздушный зазор $2l_{\text{в}} = 1$ мм, сечение магнитопровода одинаково по всей длине электромагнита и равно 16 см^2 .

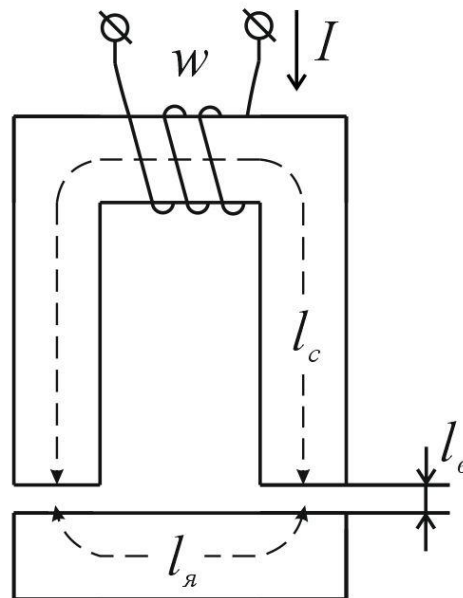


Рис. 4.3

Ответ: $F = 1080 \text{ A}$

Задача 4.4.

Магнитная цепь (рис. 4.4) выполнена из электротехнической стали 1561 и имеет следующие размеры: $l_1 = 40$ см; $l_2 = 12$ см; $l_3 = 30$ см; $S_1 = S_3 = 4 \text{ см}^2$; $S_2 = 2 \text{ см}^2$. Магнитодвижущая сила $F = 1800 \text{ A}$, поток в первом стержне

$$\Phi_1 = 5,94 \cdot 10^{-4} \text{ Вб.}$$

Определить длину воздушного зазора $l_{\text{в}}$.

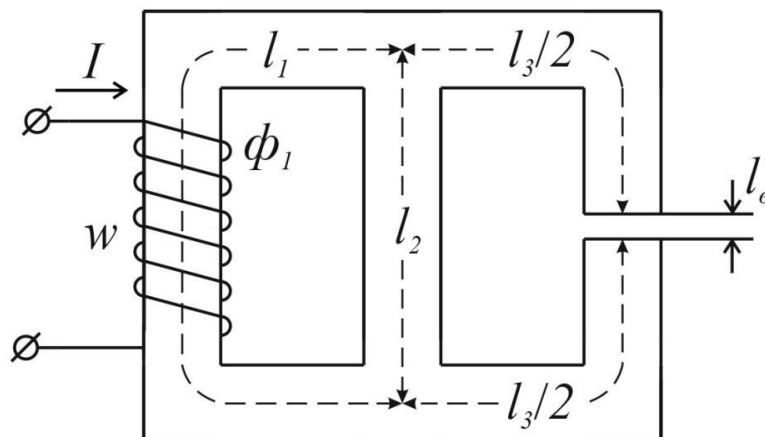


Рис. 4.4

Ответ: $l_b = 1,3$ мм.

Контрольные вопросы:

1. Как создаётся магнитное поле?
2. Перечислите основные параметры магнитного поля и поясните их физический смысл.
3. Назовите единицу измерения таких величин, как напряжённость магнитного поля, магнитный поток, магнитная индукция.
4. Какие материалы называют ферромагнитными, в чём их особенности, где они применяются?
5. Сформулируйте закон Ома для магнитной цепи.
6. Сформулируйте законы Кирхгофа для магнитных цепей.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5

Исследование электромагнетизма вокруг прямого проводника и катушки с током

Цель: закрепить знания, определения, характеристики магнитного поля, индукции магнитного поля.

Задача 5.1.

Определить величину и направление магнитной индукции на осях двух параллельных прямолинейных проводов с током $I=215$ А. Радиус проводов $r = 0,4$ см, расстояние между осями проводов $d=6$ см, направления токов противоположны.

Решение.

Магнитная индукция B_d на расстоянии d от оси каждого провода равна

$$B_d = \mu_0 H_d,$$

где H_d = напряженность магнитного поля одного провода на оси другого провода.

Величина напряженности магнитного поля

$$H_d = \frac{I}{2\pi d} = \frac{215}{2\pi \cdot 0,6} = 570 \text{ А/м}.$$

Тогда

$$B_d = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 570 = 7,15 \cdot 10^{-4} \text{ Тл}.$$

Векторы магнитной индукции направлены перпендикулярно к плоскости, проходящей через оси проводов.

Задача 5.2.

Определить величину магнитного потока прямоугольной измерительной катушки площадью $S = 0,05 \text{ м}^2$, расположенной перпендикулярно к линиям равномерного магнитного поля с индукцией $B = 1,5 \text{ Тл}$.

Решение.

Магнитный поток катушки

$$\Phi = BS = 1,5 \cdot 0,05 = 75 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}.$$

Задача 5.3.

Цилиндрическая катушка с сердечником из неферромагнитного материала $\mu = 1$, с числом витков 2000 имеет длину 30 см и диаметр 5 см. определить магнитный поток катушки при токе в ней 5 А.

Ответ. $\Phi = 8,1 \cdot 10^{-6} \text{ Вб}$.

Задача 5.4.

Найти скорость изменения магнитного потока через контур, в котором возбуждается индукционный ток 2 А. Сопротивление контура 0,2 Ом, число витков в контуре равно 10.

Ответ. 0,04 Вб/с

Контрольные вопросы:

1. Когда возникает ЭДС индукции и как определить её направление?
2. Как определяется индукция магнитного поля?
3. Как определяется магнитный поток?
4. Сформулируйте правило Ленца и поясните его.
5. Когда возникает электромагнитная сила и от чего она зависит?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6

Исследование электромагнитной индукции

Цель: закрепить знания, определения, характеристики магнитного поля, научиться давать объяснения явления электромагнитной индукции, самоиндукции и взаимной индукции.

Задача 6.1.

Определить ЭДС самоиндукции, если в цепи с индуктивностью 5 мГн ток уменьшается со скоростью 600 А/с.

Решение.

Так как скорость уменьшения тока

$$-\frac{di}{dt} = 600 \text{ А/с},$$

то ЭДС самоиндукции

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = 5 \cdot 10^{-3} \cdot 600 = 3 \text{ В}.$$

Задача 6.2.

Определить энергию магнитного поля соленоида, в котором при токе $I = 4 \text{ А}$ создается магнитный поток $\Phi = 0,5 \text{ Вб}$.

Решение.

Энергия магнитного поля определяется формулой

$$W_m = \frac{LI^2}{2}.$$

где L – индуктивность соленоида.

$$L = \frac{\Phi}{I}.$$

Подставив выражение для индуктивности в уравнение энергии, получим

$$W_m = \frac{\Phi I}{2} = \frac{0,5 \cdot 4}{2} = 1 \text{ Дж}.$$

Задача 6.3.

Определить индуктивность кольцевой катушки (тороида), размещенной на магнитопроводе из литой стали. Средняя длина силовой линии 80 см, поперечное сечение кольца 12 см^2 , число витков катушки 200, ток катушки 2 А.

Ответ: $L = 0,1 \text{ Гн}$.

Задача 6.4.

Определить энергию магнитного поля катушки индуктивности с индуктивностью 20 мГн при наличии в ней постоянного тока 20 А.

Ответ: $W = 4 \text{ Дж}$.

Задача 6.5.

Определить ЭДС самоиндукции катушки индуктивности с индуктивностью 0,3 Гн, активным сопротивлением 2 Ом, если при включении ее в питающую сеть постоянного тока с напряжением 110 В установившееся значение тока наступает через время 0,1 с.

Ответ: $E = 165$ В

Контрольные вопросы:

1. Что называют самоиндукцией?
2. Чему равна ЭДС самоиндукции?
3. Что называют взаимной индукцией?
4. Как рассчитывается ЭДС взаимной индукции?
5. Чему равна энергия магнитного поля?

ТЕМА 3

**Электрические цепи переменного тока основные
теоретические положения**

1. Мгновенное значение величины, синусоидально изменяющейся с течением времени.

$$a = A_m \sin(\omega t + \psi) = A_m \sin \left[\omega \left(t + \frac{\psi}{\omega} \right) \right], \quad (\text{T3.1})$$

где A_m – максимальное значение, или амплитуда;
 $\omega t + \psi$ – фаза (фазовый угол);
 ψ – начальная фаза (начальный фазовый угол);
 $\frac{\psi}{\omega}$ – начальный фазовый сдвиг;
 ω – угловая частота.

Период T , угловая частота ω и частота f связаны соотношением

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}, \quad f = \frac{1}{T}.$$

По уравнению (Т3.1) на рис. Т3.1 построены синусоида и соответствующая векторная диаграмма (вектор A_m вращается с постоянной угловой скоростью ω против часовой стрелки).

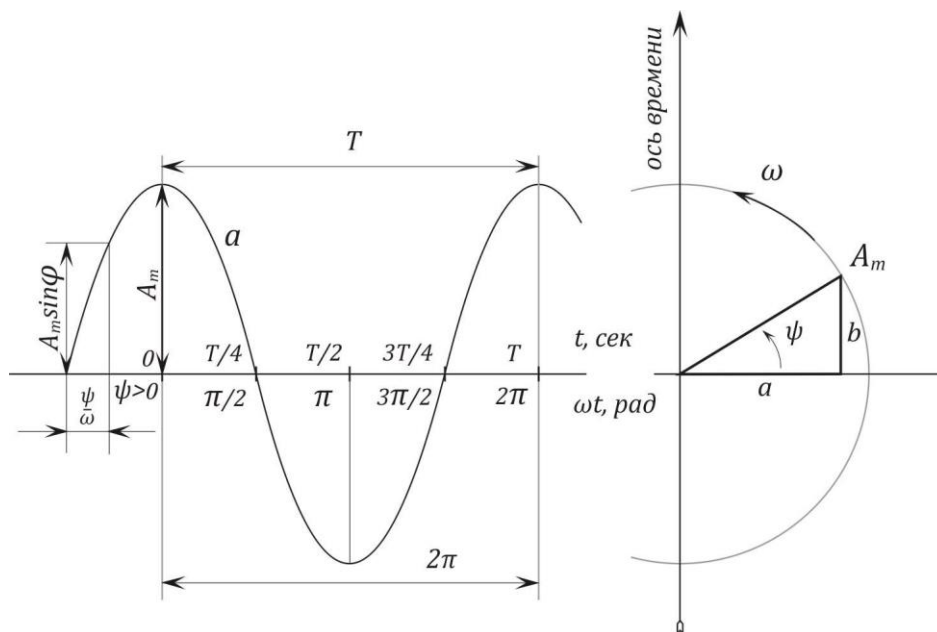


Рис. Т3.1

2. Действующие значения синусоидально изменяющихся тока, ЭДС и напряжения соответственно равны:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707I_m, \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}, \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$

3. Средние значения синусоидально изменяющегося тока, ЭДС и напряжения за положительную полуволну:

$$I_{\text{cp}} = \frac{2}{\pi} I_m = 0.637I_m, \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}, \quad U = \frac{2}{\pi} U_m.$$

Среднее значение синусоидально изменяющейся величины $a = A_m \sin(\omega t + \psi)$ за целый период равно нулю.

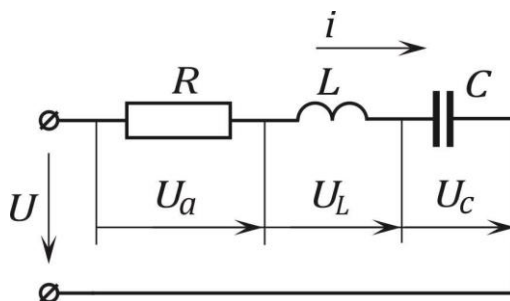


Рис. Т3.2

4. **Второй закон Кирхгофа.** Уравнение второго закона Кирхгофа для мгновенных значений напряжений и тока, проходящих в одноконтурной цепи, состоящей их последовательно со-

единенных активного сопротивления R , индуктивности L и емкости C (рис. Т3.2), имеет вид

$$u = u_a + u_L + u_c,$$

где $u_a = iR$ – падение напряжения на активном сопротивлении;
 $u_L = L \frac{di}{dt}$ – падение напряжения на индуктивности, причем
 $u_L = -e_L$, где ЭДС самоиндукции $e_L = -L \frac{di}{dt}$,

$$i = \frac{1}{L} \int_0^t u_L dt + i(0),$$

u_c – падение напряжения на емкости, причем

$$i = C \frac{du_c}{dt}, \quad u_c = \frac{1}{C} \int_0^t i dt + u_c(0).$$

5. Цепь из последовательно соединенных элементов. Если цепь, состоящая из последовательно соединенных R , L и C , включена на синусоидально изменяющееся напряжение

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi),$$

То по ней проходит ток

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi),$$

где

$$I_m = \frac{U_m}{Z} = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}; \quad (\text{Т3.2})$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}, \quad -90^\circ \leq \varphi \leq +90^\circ.$$

Соотношение (Т3.2) является уравнением закона Ома для амплитудных значений напряжения и тока. Закон Ома для действующих значений напряжения и тока имеет вид

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}},$$

$\omega L = x_L$ – индуктивное сопротивление; $\frac{1}{\omega C} = x_C$ – емкостное сопротивление; $\omega L - \frac{1}{\omega C} = x = x_L - x_C$ – реактивное сопротивление; $z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = \sqrt{R^2 + x^2}$ – полное сопротивление;

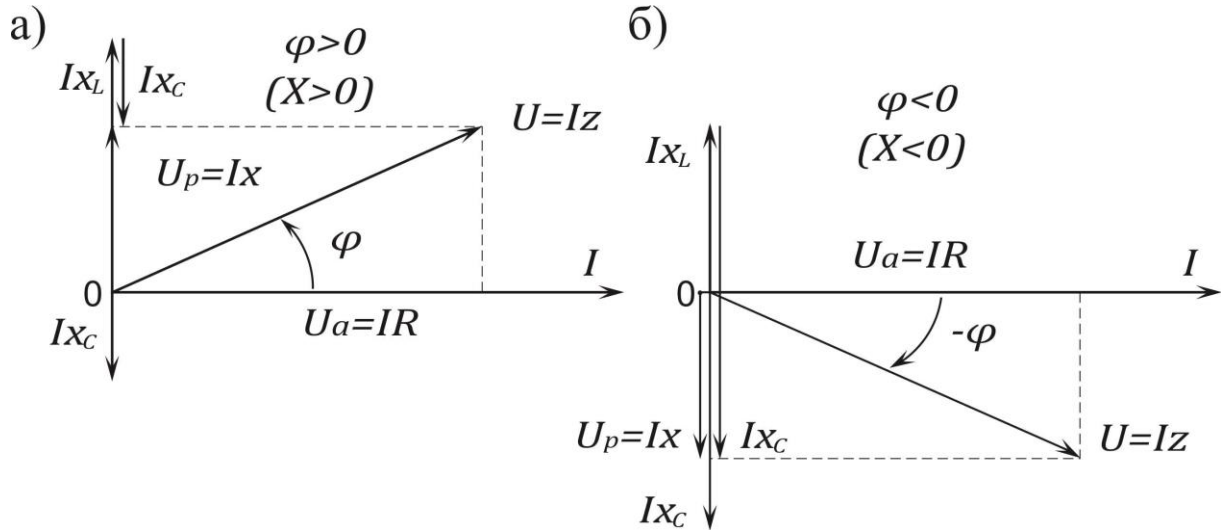


Рис. Т3.3

6. Треугольник напряжений. Приложенное к цепи напряжение U может быть разложено на составляющие (рис. Т3.3,а и б): $U_a = IR$ – активную, совпадающую по фазе с током, и $U_p = Ix$ – реактивную; вектор U_p опережает вектор тока I на четверть периода, если в цепи преобладает индуктивное сопротивление $x = x_L - x_C > 0$ (рис. Т3.3,а); U_p отстает от I на четверть периода, если в цепи преобладает емкостное сопротивление $x = x_L - x_C < 0$ (рис. Т3.3,б);

$$U_a = IR = U \cos \varphi;$$

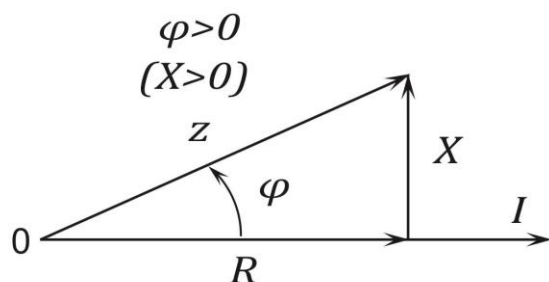
$$U_p = Ix = U \sin \varphi;$$

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_p^2} = Iz.$$

7. Соотношения, связывающие $\cos\varphi$, $\sin\varphi$ и $\operatorname{tg}\varphi$ через сопротивления цепи. Из треугольника сопротивлений (рис. Т3.4,а и б) следуют соотношения:

$$\cos\varphi = \frac{R}{z}, \quad \sin\varphi = \frac{x}{z}, \quad \operatorname{tg}\varphi = \frac{x}{R}.$$

а)



б)

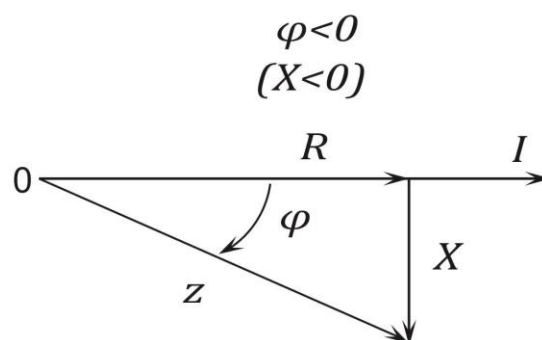
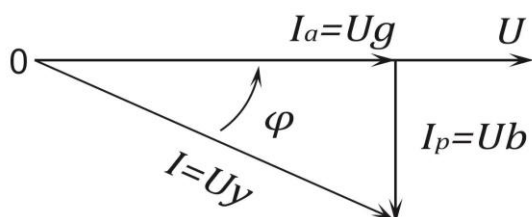


Рис. Т3.4

8. Треугольник токов. Ток I , проходящий в цепи, может быть разложен на две составляющие (рис. Т3.5): I_a – активную, совпадающую по фазе с приложенным напряжением, и I_p – реактивную;

а)

 $\varphi > 0$
 $(b > 0)$


б)

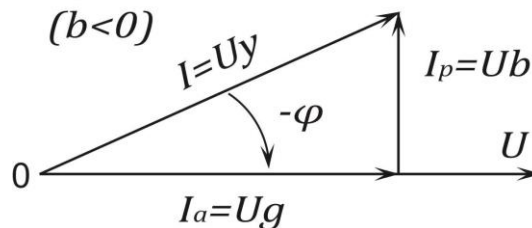
 $\varphi < 0$
 $(b < 0)$


Рис. Т3.5

I_p отстает от напряжения \dot{U} на четверть периода, когда в цепи преобладает индуктивное сопротивление $x = x_L - x_C > 0$ (рис. Т3.5,а) и опережает \dot{U} на четверть периода при преобладании емкостного сопротивления $x = x_L - x_C < 0$ (рис. Т3.5,б):

$$I_a = I \cos\varphi = Ug;$$

$$I_p = I \sin \varphi = Ub;$$

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = Uy$$

Цепь, состоящая из последовательно соединенных активного R и реактивного сопротивлений $x = x_L - x_C$ (см. рис. Т3.2), может быть заменена эквивалентной схемой, состоящей из параллельно соединенной активной проводимости g и реактивной проводимости b (рис. Т3.6,а). Реактивная проводимость может быть положительной величиной ($b > 0$), если цепь имеет индуктивный характер $b = -b_L = \frac{1}{\omega L_{\Pi}}$ (рис. Т3.6,б), и может быть отрицательной величиной ($b < 0$), если цепь имеет емкостный характер $b = -b_C = -\omega C_{\Pi}$ (рис. Т3.6,в).

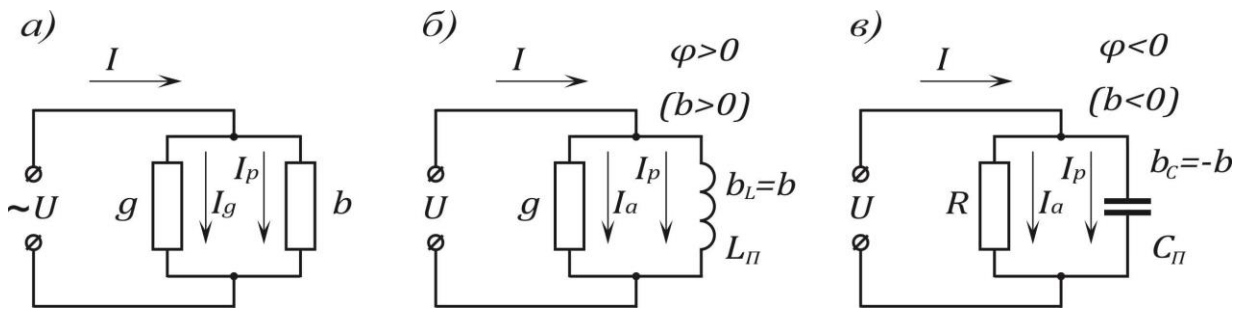


Рис. Т3.6

9. **Треугольник проводимостей** (рис. Т3.7,а и б) подобен треугольнику токов (см. рис. Т3.5):

$$\cos \varphi = \frac{g}{y}, \quad \sin \varphi = \frac{b}{y}, \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{b}{g}.$$

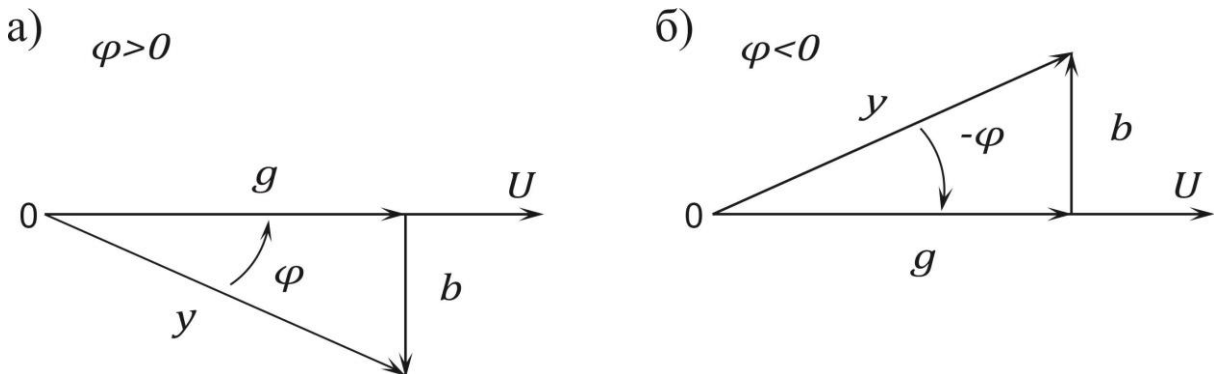


Рис. Т3.7

10. Переход от последовательной схемы (см. рис. ТЗ.2) **к эквивалентной параллельной схеме** (см. рис. ТЗ.6) осуществляется по формулам:

$$\left. \begin{aligned} g &= \frac{R}{R^2 + x^2} = \frac{R}{z^2}, & b &= \frac{x}{R^2 + x^2} = \frac{x}{z^2}; \\ y &= \sqrt{g^2 + b^2} = \frac{1}{\sqrt{R^2 + x^2}} = \frac{1}{z}. \end{aligned} \right\}$$

При переходе от параллельной схемы (см. рис. ТЗ.6) **к эквивалентной последовательной** (см. рис. ТЗ.2) ее параметры определяются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{g}{g^2 + b^2} = \frac{g}{y^2}, & x &= \frac{b}{g^2 + b^2} = \frac{b}{y^2}; \\ z &= \sqrt{R^2 + x^2} = \frac{1}{\sqrt{g^2 + b^2}} = \frac{1}{y}. \end{aligned} \right\}$$

11. Мощности. Активная, реактивная и полные мощности определяются по формулам:

$$P = I^2 R = UI \cos \varphi;$$

$$Q = I^2 x = UI \sin \varphi;$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = UI = I^2 z = U^2 y.$$

Для всякой электрической цепи справедливы следующие балансы мощностей:

$$\left. \begin{aligned} \sum P_{\text{и}} &= \sum P_{\text{п}}; \\ \sum Q_{\text{и}} &= \sum Q_{\text{п}}. \end{aligned} \right\},$$

где $P_{\text{и}}$ и $Q_{\text{и}}$ – мощность источников, $P_{\text{п}}$ и $Q_{\text{п}}$ – мощности потребителей.

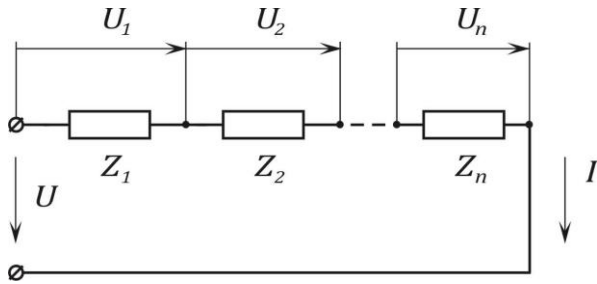


Рис. Т3.8

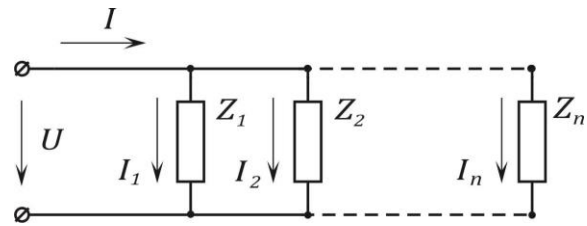


Рис. Т3.9

12. Последовательное соединение сопротивлений. При последовательном соединении сопротивлений (рис. Т3.8)

$$\left. \begin{aligned} U_a &= \sum_{k=1}^n U_{ka} = I \sum_{k=1}^n R_k; \\ U_p &= \sum_{k=1}^n U_{kp} = I \sum_{k=1}^n x_k; \\ U &= \sqrt{U_a^2 + U_p^2} = I \sqrt{\left(\sum_{k=1}^n R_k \right)^2 + \left(\sum_{k=1}^n x_k \right)^2} \end{aligned} \right\}$$

Сдвиг между общим напряжением U и током I :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sum_{k=1}^n x_k}{\sum_{k=1}^n R_k}$$

13. Параллельное соединение сопротивлений. При параллельном соединении сопротивлений (рис. Т3.9):

$$\left. \begin{aligned} I_a &= \sum_{k=1}^n I_{ka} = U \sum_{k=1}^n g_k ; \\ I_p &= \sum_{k=1}^n I_{kp} = U \sum_{k=1}^n b_k ; \\ I &= \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = U \sqrt{\left(\sum_{k=1}^n g_k \right)^2 + \left(\sum_{k=1}^n b_k \right)^2} . \end{aligned} \right\}$$

Сдвиг фаз между напряжением U и током I , проходящим в неразветвленной части цепи,

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sum_{k=1}^n b_k}{\sum_{k=1}^n g_k}.$$

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7

Исследование параметров цепей переменного тока.

Постоянные и переменные напряжения.

Параметры синусоидальных сигналов.

Среднеквадратичные величины напряжения и тока

Цель: изучение и закрепление основных понятий цепей переменного тока, применение аналитического метода для расчета цепей переменного тока.

Задача 7.1.

Функция задана в виде временной диаграммы (рис.7.1), амплитудное или максимальное значение которой равно 10 (А).

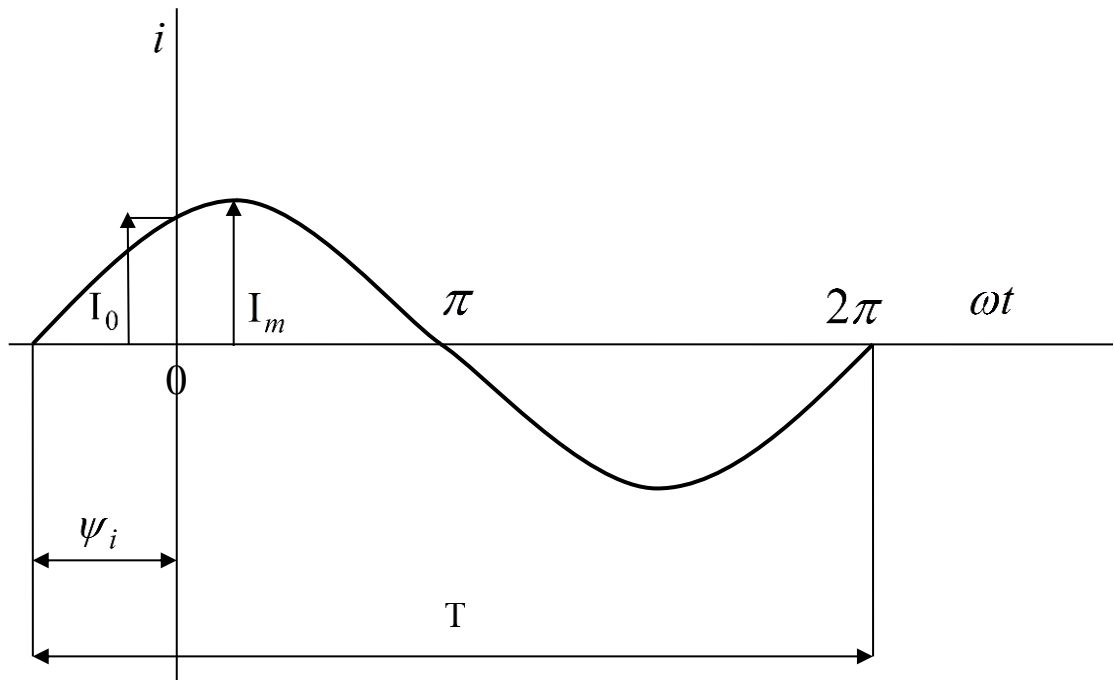


Рис. 7.1

Период изменения синусоидального тока $T=0,02$ с, начальный фазовый угол $\psi_i = 45^\circ$

1. Записать эту функцию в тригонометрическом виде.
2. Определить действующее и среднее значение тока.
3. Определить значение I_0 .
4. Изобразить функцию комплексным числом.
5. Изобразить функцию в виде вектора на комплексной плоскости.

Последовательность операций расчета

1. Мгновенное значение тока, синусоидально изменяющегося с течением времени, $i(t) = I_m \sin \omega t$, где I_m – амплитудное значение тока.

$(\omega t + \psi_i)$ – фазовый угол.

ω – угловая частота.

Период T , угловая частота ω и циклическая частота f связаны соотношением $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$, $f = \frac{1}{T}$, $i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$

2. Действующее I и среднее I_{cp} значение тока связаны соотношением $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$, $I_{cp} = \frac{2}{\pi} I_m$

3. В момент времени $t = 0$ ток I_0 равен $I_0 = I_m \sin \psi_i$

5. Изображение функции тока в виде вектора тока на комплексной плоскости представлено на рис.7.2.

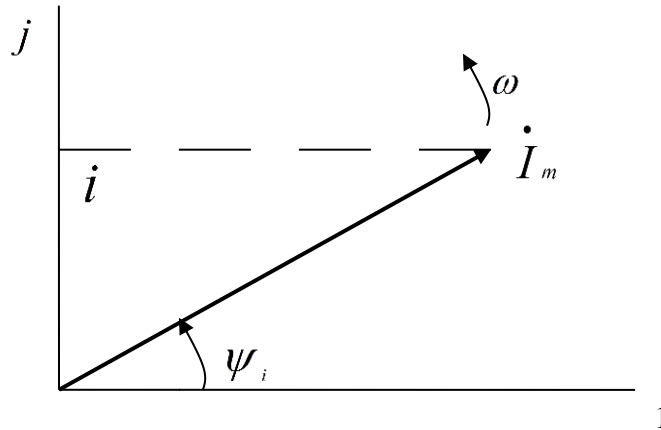


Рис. 7.2

Проекция вращающегося против часовой стрелки с постоянной угловой скоростью ω вектора \dot{I}_m на мнимую ось числовой плоскости дает мгновенное значение синусоидальной величины i (рис.7.2). Этот вращающийся вектор записывается в виде

$$\dot{I}_m = I_m e^{j(\omega t + \psi_i)}$$

Угол ψ_i показывает положение вектора \dot{I}_m в начальный момент времени $t = 0$ ($\dot{I}_m = I_m e^{j\psi_i}$). Числовая величина мнимой части $\dot{I}_m = I_m e^{j(\omega t + \psi_i)}$ дает мгновенное значение синусоидально-изменяющейся величины

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i) \equiv \text{Im}[I_m e^{j(\omega t + \psi_i)}] = \text{Im}(\dot{I}_m e^{j\omega t}).$$

Символ мнимой части Im иногда опускают и последнее выражение в форме: $i = \dot{I}_m e^{j\omega t}$, где \equiv — знак соответствия. Ком-

плексное число амплитудного значения тока \dot{I}_m ($I_m e^{j\psi_i}$) называется комплексной амплитудой. Модуль комплексного действующего значения тока I совпадает с действующим значением соответствующей синусоидальной величины, а аргумент совпадает с начальной фазой этой величины. Комплексная амплитуда и действующее значение связаны равенством

$$\dot{I} = \frac{\dot{I}_m}{\sqrt{2}} = I e^{j\psi_i}.$$

Тогда комплексное действующее значение тока можно представить вектором на комплексной плоскости (рис.7.3).

Положительная начальная фаза ψ_i откладывается от действительной оси против часовой, а отрицательная – по часовой стрелке.

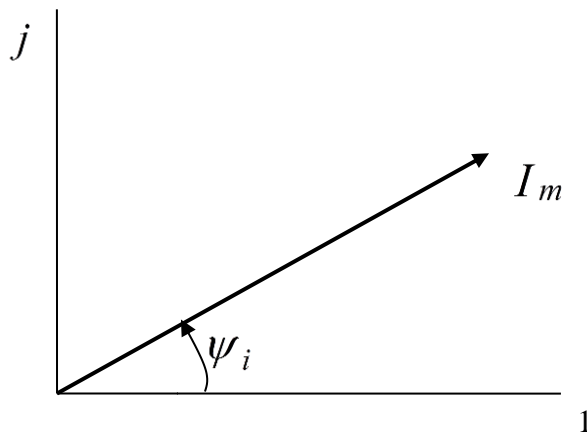


Рис. 7.3

Решение.

1. Функция в тригонометрической форме

$$i(t) = 10 \sin(314t + 45^\circ).$$

2. Действующее и среднее значение тока

$$I = \frac{10}{\sqrt{2}} = 7,09 \text{ A}, \quad I_{cp} = \frac{2}{\pi} \cdot 10 = 6,37 \text{ A}.$$

3. Значение тока в начальный момент времени

$$I_0 = 10 \sin 45^\circ = 7,1 \text{ A}.$$

4. Комплексное действующее значение тока в алгебраической форме:

$$\dot{I} = 7,09 + j7,09 \text{ A.}$$

В показательной форме:

$$\dot{I} = 7,09e^{j45^\circ} \text{ A.}$$

В тригонометрической:

$$\dot{I} = 7,09 \cos 45^\circ + j \sin 45^\circ \text{ A.}$$

Векторная диаграмма на комплексной плоскости представлена на рис.7.4. Масштаб по току $m_I = 1(\text{A}/\text{см})$

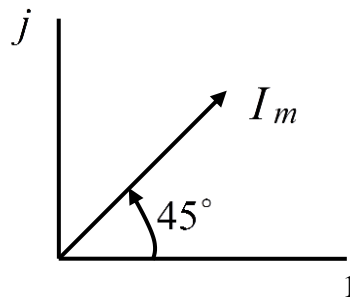


Рис. 7.4

Задача 7.2.

Построить временные диаграммы напряжений и тока, начертить векторы, изображающие заданные синусоидальные функции.

$$U = 100 \sin(157t + \frac{\pi}{10}) \text{ B,}$$

$$i = 5 \sin(157t - \frac{\pi}{8}) \text{ A.}$$

Чему равен сдвиг фаз между напряжением и током? Определить среднее и действующее значения напряжения и тока, а также частоту и период. Записать выражения комплексных действующих значений напряжения и тока, построить векторную диаграмму.

Решение.

1. Временные диаграммы U, i изображены на рис.7.5.

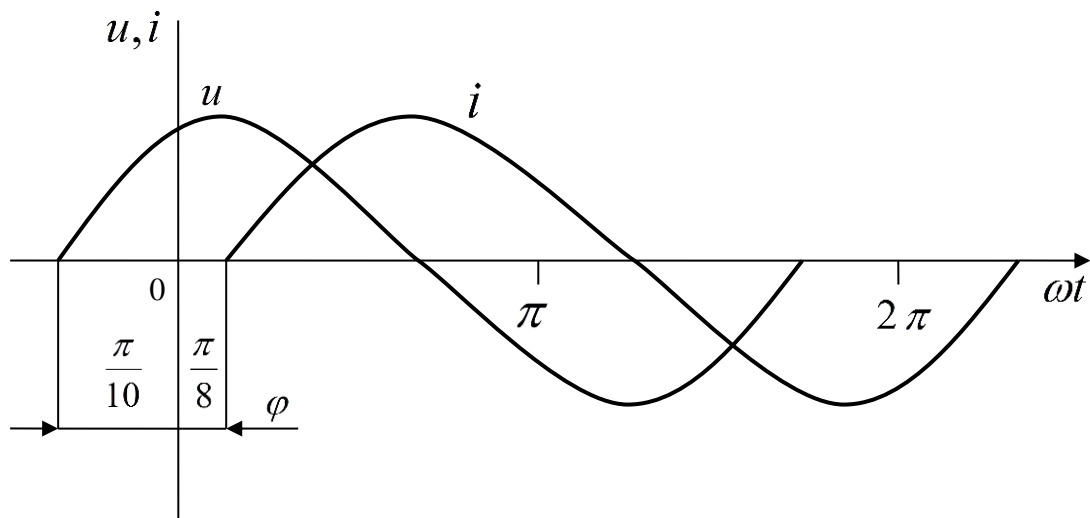


Рис. 7.5

2. Угол сдвига фаз между напряжением и током

$$\varphi = \frac{\pi}{10} - \frac{\pi}{8} = 40,5^\circ.$$

3. Средние значения напряжения и тока

$$U_{cp} = \frac{2}{\pi} \cdot 100 = 63,7 \text{ В}, \quad I_{cp} = \frac{2}{\pi} \cdot 5 = 3,18 \text{ А}.$$

4. Действующие значения напряжения и тока

$$U = \frac{100}{\sqrt{2}} = 70,9 \text{ В}, \quad I = \frac{5}{\sqrt{2}} = 3,54 \text{ А}.$$

$$5. \text{ Период } T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2 \cdot 3,14}{157} = 0,04 \text{ с}$$

$$\text{и частота } f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,04} = 25 \text{ Гц}.$$

6. Выражения комплексных действующих значений напряжения $\dot{U} = Ue^{j\psi_u} = 70,9e^{j18^\circ} \text{ В}$ и тока $\dot{I} = Ie^{j\psi_i} = 3,54e^{-j22^\circ 30'} \text{ А},$

где ψ_U и ψ_i – соответственно начальные фазы напряжения и тока.

7. Векторная диаграмма напряжения и тока представлена на рис.7.6.

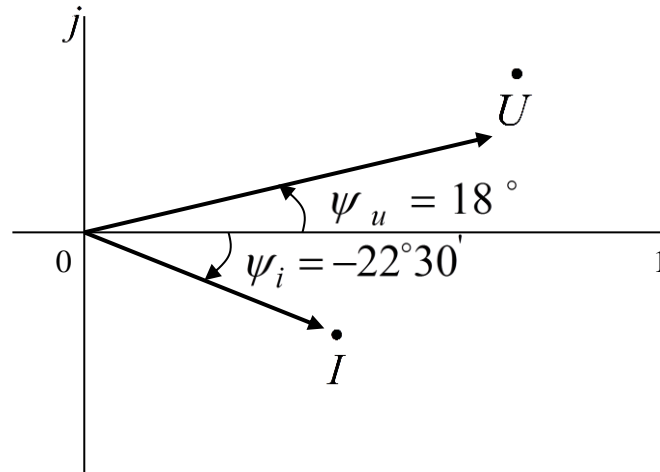


Рис. 7.6

Задача 7.3.

Найти аналитически и при помощи векторной диаграммы сумму и разность двух синусоидальных токов:

$$i_1 = 100 \sin(\omega t + 30^\circ) \text{ мА};$$

$$i_2 = 120 \sin(\omega t - 45^\circ) \text{ мА}.$$

Решение.**1. Сумма токов**

$$i' = i_1 + i_2 = 100 \sin(\omega t + 30^\circ) + 120 \sin(\omega t - 45^\circ) = I_m' \sin(\omega t + \psi_i'),$$

где I_m' - амплитудное значение суммарного тока i' ; ψ_i' начальная фаза тока.

Значения I_m' и ψ_i' определяем по формулам:

$$I_m' = \sqrt{I_{1m}^2 + I_{2m}^2 + 2I_{1m}I_{2m} \cos(\psi_1 - \psi_2)};$$

$$\psi_i' = \arctg \frac{100 \sin 30^\circ + 120 \sin(-45^\circ)}{100 \cos 30^\circ + 120 \cos(-45^\circ)} = -10^\circ 10'.$$

На рис.7.7 представлена векторная диаграмма токов i_1 и i_2 , из которой (по масштабу) могут быть получены те же значения.

2. Разность токов

$$i'' = i_1 - i_2 = 100 \sin(\omega t + 30^\circ) - 120 \sin(\omega t - 45^\circ).$$

Воспользовавшись тригонометрической формулой $-\sin \alpha = \sin(\alpha + 180^\circ)$, перепишем выражение разности токов:

$i'' = 100 \sin(\omega t + 30^\circ) - 120 \sin(\omega t - 45^\circ) = 135 \sin(\omega t + 87^\circ) \text{ мА}$,
 где амплитудное значение разностного тока $I_m'' = 135 \text{ мА}$, а начальная фаза $\psi'' = 87^\circ$.

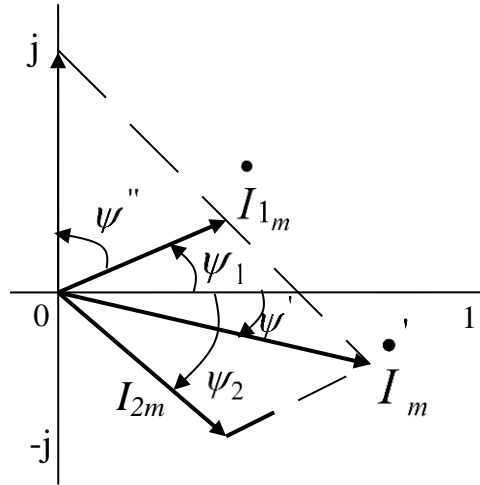


Рис. 7.7

Задача 7.4.

Написать уравнения, выражающие зависимость напряжения и тока от времени в электроплитке сопротивлением 60 Ом, включенной в цепь переменного тока напряжением 220 В, если его частота 50 Гц.

Задача 7.5.

Определить Амплитудные и действующие значения синусоидального напряжения, если его среднее значение 198 В.

Ответ. $U_m = 310 \text{ В}$; $U = 220 \text{ В}$.

Контрольные вопросы:

1. Какие величины определяют синусоидальную функцию времени?
2. Как связаны между собой f и T ; f и ω ; T и ω ? Назовите единицы измерения этих величин.
3. Как связаны между собой амплитудные и действующие значения синусоидального тока?
4. Как определить угол сдвига фаз между напряжением и током?
5. Как определяются активная, реактивная и полная мощности цепи переменного тока?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 8

Исследование индуктивности в цепях переменного тока

Цель: научиться вести самостоятельный поиск решения примеров и задач по однофазным электрическим цепям переменного тока с активным и индуктивным сопротивлениями.

Задача 8.1.

Последовательно с реостатом, имеющим только активное сопротивление $R_1 = 20 \text{ Ом}$, включена катушка, параметры которой $R = 6,7 \text{ Ом}$ и $L = 42,7 \text{ мГн}$ (рис. 8.1,а). Определить ток, проходящий в цепи, разность фаз между напряжением и током, напряжения на реостате и катушке, а также сдвиг фаз между напряжением источника и напряжением на катушке, если $U = 220 \text{ В}$. Частота переменного тока $f = 50 \text{ Гц}$. Вычислить активную, реактивную и полную мощности катушки, построить векторную диаграмму.

Решение.

$$\omega L = 2\pi \cdot 50 \cdot 42,7 \cdot 10^{-3} = 13,4 \text{ Ом};$$

$$z_k = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} = \sqrt{6,7^2 + 13,4^2} = 15 \text{ Ом};$$

$$z_{\Sigma} = \sqrt{(R_1 + R)^2 + (\omega L)^2} = \sqrt{26,7^2 + 13,4^2} = 29,7 \text{ Ом}.$$

В цепи проходит ток

$$I = \frac{U}{z_{\Sigma}} = \frac{220}{29,9} = 7,35 \text{ А}.$$

Разность фаз между напряжением и током определяется из соотношения

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi_{\Sigma} &= \frac{\omega L}{R + R_1} = \frac{13,4}{26,7} = 0,5; \\ \varphi_{\Sigma} &= 25,5^{\circ}. \end{aligned}$$

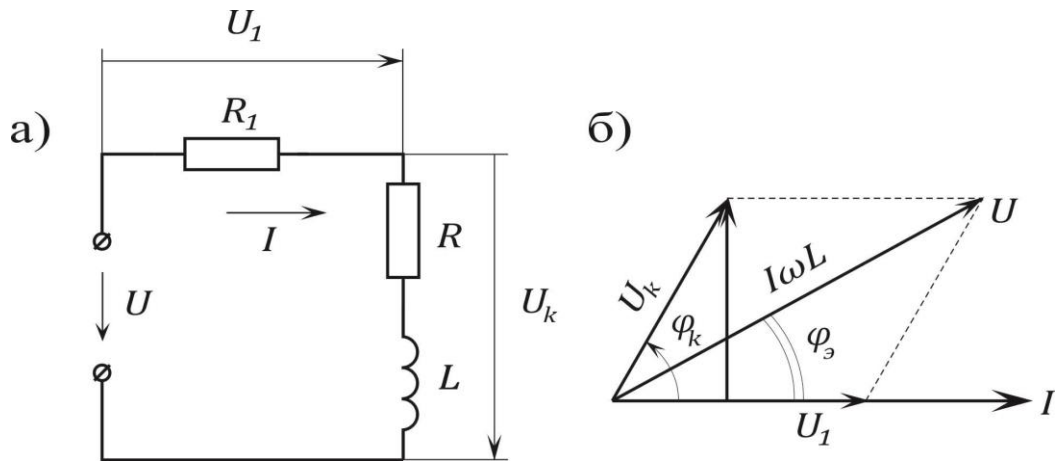


Рис. 8.1

Напряжения на реостате и катушке

$$U_1 = IR_1 = 7,35 \cdot 20 = 147 \text{ В},$$

$$U_k = Iz_k = 7,35 \cdot 15 = 110 \text{ В}.$$

Сдвиг фаз между напряжением источника и напряжением на катушке φ найдется как разность фазовых углов φ_k и φ_3 (см. векторную диаграмму рис. 8.1, б):

$$\operatorname{tg} \varphi_k = \frac{\omega L}{R} = \frac{13,4}{6,7} = 2; \quad \varphi_k = 63,5^\circ;$$

$$\varphi = \varphi_k - \varphi_3 = 63,5 - 26,5 = 37^\circ.$$

Активная, реактивная и полная мощности катушки:

$$P_k = I^2 R = 7,35^2 \cdot 6,7 = 362 \text{ Вт};$$

$$Q_k = I^2 \omega L = 7,35^2 \cdot 13,4 = 724 \text{ ВАр};$$

$$S_k = U_k I = 110 \cdot 7,35 = 808 \text{ ВА}.$$

Задача 8.2.

Для определения электрических параметров реальной катушки в цепь переменного тока с частотой $f = 20 \text{ Гц}$ были подсоединены вольтметр, амперметр и ваттметр (рис.8.2). Приборы дали следующие показания: $U = 100 \text{ В}$, $I = 1 \text{ А}$, $P = 10 \text{ Вт}$.

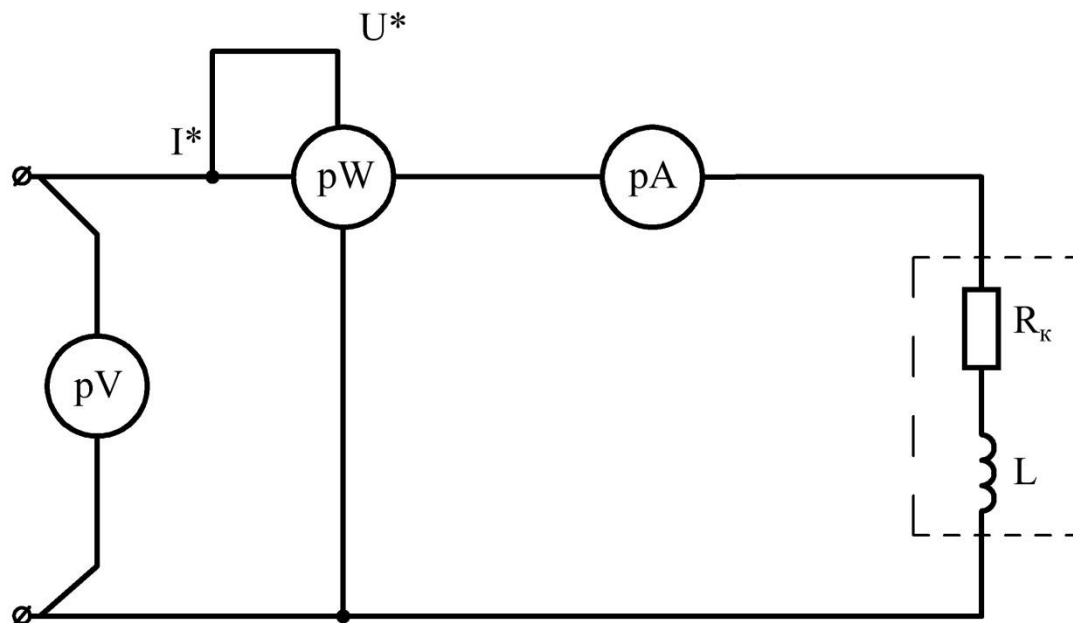


Рис. 8.2

Определить активное, индуктивное, полное сопротивления, индуктивность, активную, реактивную и полную мощности, коэффициент мощности. Построить векторную диаграмму тока и напряжений катушки.

1. Под электрическими параметрами реальной катушки понимаются: сопротивления, мощности, индуктивность и коэффициент мощности.

2. При расчете параметров катушки сопротивлениями и мощностями приборов пренебрегают.

3. Ваттметр, подключенный, как показано на рис.9, измеряет активную мощность катушки, которая расходуется на ее нагрев.

4. Катушка обладает распределенными параметрами сопротивлений, поэтому вольтметр измеряет полное падение напряжения. Оно состоит из активной и индуктивной составляющих.

5. Амперметр измеряет полный ток катушки, величина которого зависит от активного и индуктивного сопротивлений.

6. При построении векторной диаграммы необходимо учитывать, что падение напряжения на активном сопротивлении катушки по фазе совпадает с током, а индуктивное – опережает ток на угол 90 градусов.

7. Строить векторную диаграмму напряжений необходимо в масштабе, т.к. она может служить проверкой правильности расчета.

Решение.

1. Сопротивления катушки:

активное:

$$r_k = \frac{P}{I^2} = \frac{10}{1^2} = 10 \text{ Ом},$$

полное:

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

индуктивное

$$x_L = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} = \sqrt{100^2 - 10^2} = 99,5 \text{ Ом}.$$

2. Индуктивность катушки

$$L = \frac{x_L}{2\pi f} = \frac{99,5}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,317 \text{ Гн} = 317 \text{ мГн}.$$

3. Мощность катушки:

активная $P_k = 10 \text{ Вт}$,

индуктивная (реактивная)

$$Q_L = I^2 x_L = 1^2 \cdot 99,5 = 99,5 \text{ ВАр},$$

полная

$$S_k = UI = \sqrt{P_k^2 + Q_L^2} = 100 \cdot 1 = 100 \text{ ВА}.$$

4. Коэффициент мощности

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{S_k} = \frac{10}{100} = 0,1; (\varphi_k = \arccos 0,1 = 84^\circ)$$

5. Векторная диаграмма тока и напряжений.

Падения напряжения на активном сопротивлении

$$U_{ак} = I r_k = 1 \cdot 10 = 10 \text{ В},$$

на индуктивном

$$U_L = I x_L = 1 \cdot 99,5 = 99,5 \text{ В},$$

и полное напряжение

$$U_k = U = I z_k = 1 \cdot 100 = 100 \text{ В}$$

или

$$U_k = \sqrt{U_{ак}^2 + U_L^2} = \sqrt{10^2 + 99,5^2} = 100 \text{ В}.$$

Порядок построения векторной диаграммы тока и напряжений следующий (рис.8.3). Строим вектор тока \vec{I} , проведя его го-

горизонтально, затем строим $\dot{U}_{ак}$, который совпадает с \dot{I} (начало $\dot{U}_{ак}$ совпадает с началом \dot{I}). Вектор \dot{U}_L строим от конца \dot{I} под углом 90 градусов, результирующий вектор $\dot{U}_к$ равен: $\dot{U}_к = \dot{U}_L + \dot{U}_{ак}$.

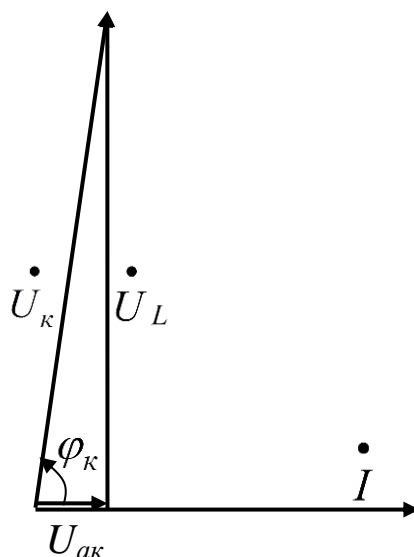


Рис. 8.3

6. Проверка расчета.

Если длину вектора $\dot{U}_к$ умножим на масштаб m_u – получим заданное напряжение на катушке 100 В. Угол $\varphi_к = \angle \dot{U}_к \dot{I}$, измеренный на векторной диаграмме, равен 84 градуса, что соответствует расчетному.

Задача 8.3.

Через реостат $R_1 = 40$ Ом и катушку индуктивности $R_L = 12$ Ом, $\omega L = 18$ Ом, соединенные последовательно, проходит ток $I = 2,2$ А. Чему равно приложенное к цепи напряжение? Подсчитать активные, реактивные и полные мощности всей цепи и ее отдельных элементов. Каков сдвиг фаз между приложенным напряжением и напряжением на катушке?

Ответ. $U = 121$ В; $P_{сх} = 252$ Вт; $Q_{сх} = 87,1$ Вар;

$S_{сх} = 266$ ВА; $P_{реост} = 193,6$ Вт; $P_{кат} = 58,4$ Вт;

$Q_{кат} = 87,1$ Вар; $\varphi - \varphi_{кат} = 37,5^\circ$.

Задача 8.4.

По показаниям приборов, включенных в цепь (рис. 8.4), определить ток, проходящий в неразветвленном участке цепи. Построить векторную диаграмму.

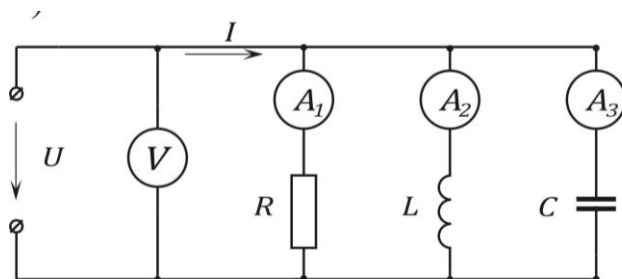


Рис. 8.4

Ответ. 5 А.

Задача 8.5.

Цепь, изображенная на рис. 8.5, подключена к источнику синусоидального напряжения $U = 96$ В. Сопротивления $R = 1$ Ом, $x_L = 5$ Ом, $x_C = 6$ Ом. Определить все токи, активную, реактивную и полную мощности. Подсчитать эквивалентные сопротивления схемы замещения, состоящей из последовательно соединенных активного и реактивного сопротивлений, и начертить ее. Построить векторную диаграмму.

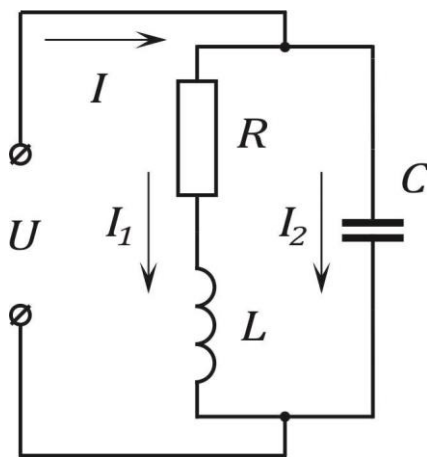


Рис. 8.5

Ответ. $I_1 = 15$ А; $I_2 = 16$ А; $I = 10,3$ А; $x = 3,9$ Ом;
 $P = 900$ Вт; $Q = 415$ ВАр; $S = 990$ ВА; $R_9 = 8,5$ Ом.

Контрольные вопросы:

1. Как рассчитывается индуктивное сопротивление?
2. Как рассчитывается полное сопротивление цепи переменного тока?
3. Запишите закон Ома для амплитудных и действующих значений напряжения и тока на индуктивном элементе.
4. Чему равен угол сдвига фаз между напряжением и током на индуктивном элементе?
5. Как определяются мощность индуктивного элемента?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 9

Исследование емкости в цепях переменного тока.

Определение емкости по фазовому сдвигу между напряжением на конденсаторе и напряжением питания

Цель: научиться вести самостоятельный поиск решения примеров и задач по однофазным электрическим цепям переменного тока с активным и емкостным сопротивлениями.

Задача 9.1.

Для определения электрических параметров последовательного соединения реостата и конденсатора в цепь переменного тока с частотой $f = 50 \text{ Гц}$ были подсоединены амперметр, ваттметр и вольтметры (рис.9.1). Приборы дали следующие показания:

$$I = 1 \text{ А}, P = 10 \text{ Вт}, U = 100 \text{ В}, U_1 = 10 \text{ В}, U_2 = 99,5 \text{ В}.$$

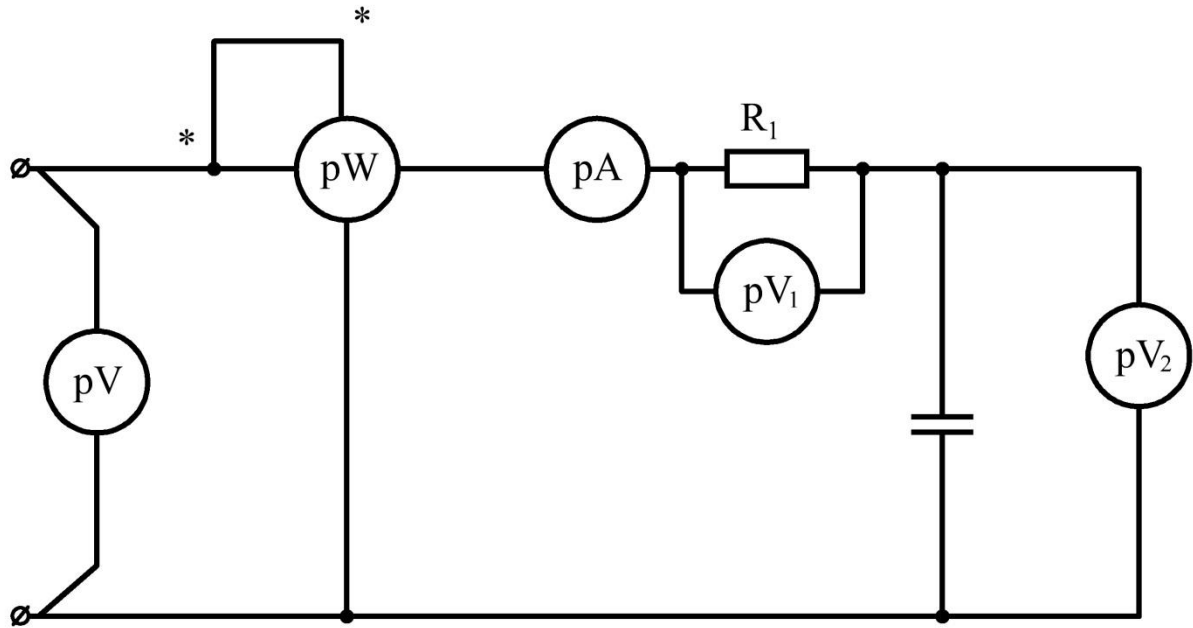


Рис. 9.1

Определить активную, емкостную и полную мощности, емкость и коэффициент мощности. Построить векторную диаграмму.

Решение.

1. Сопротивление электрической цепи:
активное

$$r = \frac{P}{I^2} = \frac{10}{1^2} = 10 \text{ Ом},$$

емкостное

$$X_C = \frac{U_2}{I} = \frac{99,5}{1} = 99,5 \text{ Ом},$$

полное

$$z = \frac{U}{I} = \sqrt{r^2 + x_C^2} = \frac{100}{1} = 100 \text{ Ом}.$$

2. Мощности:

активная

$$P = I^2 r = 1^2 \cdot 10 = 10 \text{ Вт},$$

емкостная

$$Q_C = I^2 x_C = 1^2 \cdot 99,5 = 99,5 \text{ ВАр},$$

полная

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q_C^2} = 100 \cdot 1 = 100 \text{ ВА.}$$

3. Емкость конденсатора

$$C = \frac{10^6}{2\pi f x_C} = \frac{10^6}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 99,5} = 32 \text{ мкФ.}$$

4. Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{10}{100} = 0,1.$$

5. Векторная диаграмма тока и напряжений (рис.9.2).

Масштаб $m_U = 20 \text{ В/см}$, вектор \dot{U}_1 направляем по \dot{I} , так как на данном участке активное сопротивление, \dot{U}_2 отстает от \dot{I} на 90 градусов, т.к. \dot{U}_2 на емкостном сопротивлении.

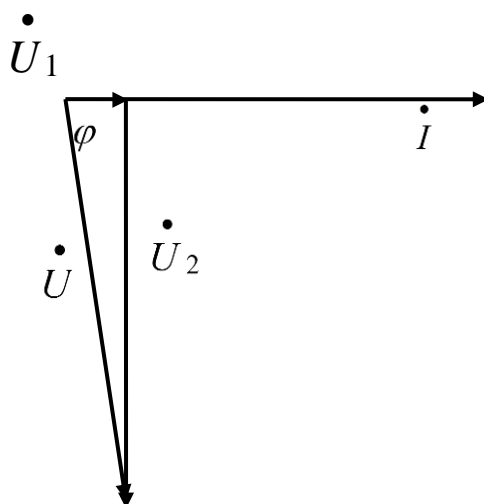


Рис. 9.2

Вектор общего напряжения

$$\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 = \dot{I} r - \dot{I} j x_C = 1 \cdot 10 - j1 \cdot 99,5 = 10 - j99,5$$

Задача 9.2.

Для определения электрических параметров последовательного соединения реостата, катушки и конденсатора (общий случай последовательной цепи) в цепь переменного тока с частотой $f = 50 \text{ Гц}$ были подсоединены амперметр, ваттметр и вольтметр (рис.9.3). Приборы дали следующие показания:

$$I = 1 \text{ А}, P = 100 \text{ Вт}, U = 100 \text{ В}, U_1 = 90 \text{ В}, U_2 = 95 \text{ В}, U_3 = 94,5 \text{ В}$$

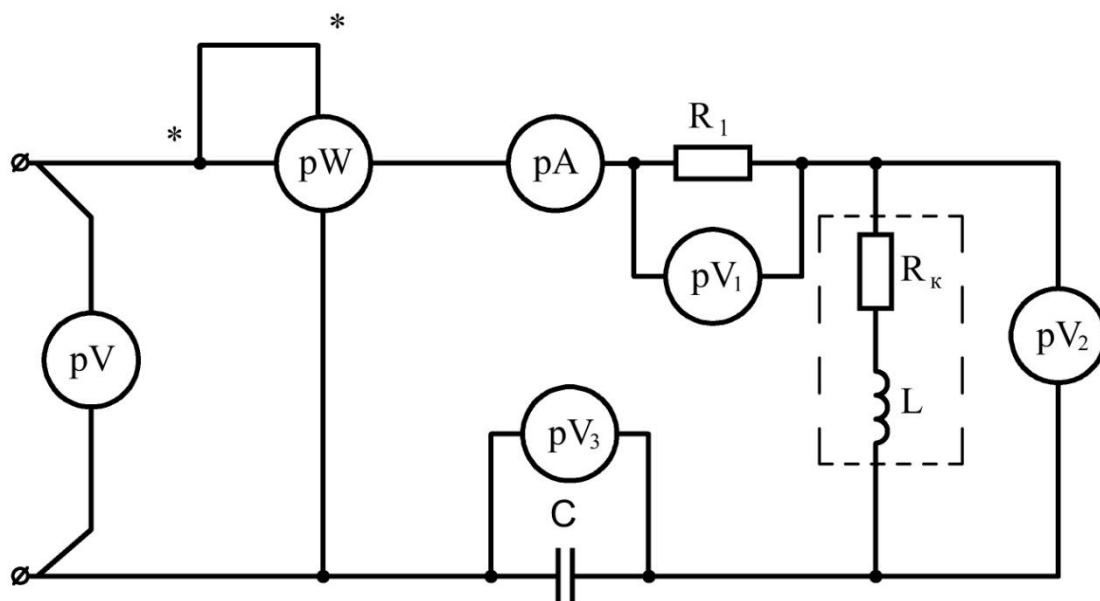


Рис. 9.3

Определить активное, индуктивное, емкостное и полное сопротивление, активную, реактивную и полную мощности. коэффициент мощности. Построить векторную диаграмму тока и напряжений, треугольник сопротивлений и мощностей.

Решение

1. Сопротивление электрической цепи и треугольник сопротивлений.

Активное

$$r = r_1 + r_k = \frac{P}{I^2} = \frac{100}{1^2} = 100 \text{ Ом},$$

индуктивное

$$x_L = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} = \sqrt{95^2 - 10^2} = 94,5 \text{ Ом},$$

где $z_k = \frac{U_2}{I} = \frac{95}{1} = 95 \text{ Ом}, \quad r_k = r - r_1 = r - \frac{U_1}{I} = 100 - \frac{90}{1} = 10 \text{ Ом},$

емкостное

$$x_C = \frac{U_3}{I} = \frac{94,5}{1} = 94,5 \text{ Ом},$$

полное

$$z = \frac{U}{I} = \sqrt{r^2 + (X_L - X_C)^2} = 100 \cdot 1 = 100 \text{ Ом}.$$

Прямоугольный треугольник сопротивлений отсутствует, т. к. $x_L = x_C$, тогда катет реактивных сопротивлений равен нулю.

2. Мощности и треугольник мощностей.

Активная

$$P = I^2 r = I^2 (r_1 + r_k) = 1^2 \cdot 100 = 100 \text{ Вт},$$

индуктивная

$$Q_L = I^2 x_L = 1^2 \cdot 94,5 = 94,5 \text{ ВАр},$$

емкостная

$$Q_C = I^2 x_C = 1^2 \cdot 94,5 = 94,5 \text{ ВАр},$$

полная

$$S = UI = \sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2} = 100 \cdot 1 = 100 \text{ ВА}.$$

Прямоугольный треугольник мощностей отсутствует, т.к. $Q_L = Q_C$, тогда катет реактивных мощностей равен нулю.

3. Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{100}{100} = 1$$

4. Векторная диаграмма тока и напряжений (рис.9.4).

Масштаб $m_U = 20 \text{ В/см}$. Векторы $\dot{U}_1, \dot{U}_{ак}$ направлены по току, \dot{U}_L опережает \dot{I} на 90 градусов, а \dot{U}_C отстает от \dot{I} на 90 градусов, тогда вектор общего напряжения $\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_3 = \dot{U}_1 + \dot{U}_{ак}$.

Таким образом, в данной цепи наблюдается резонанс напряжений.

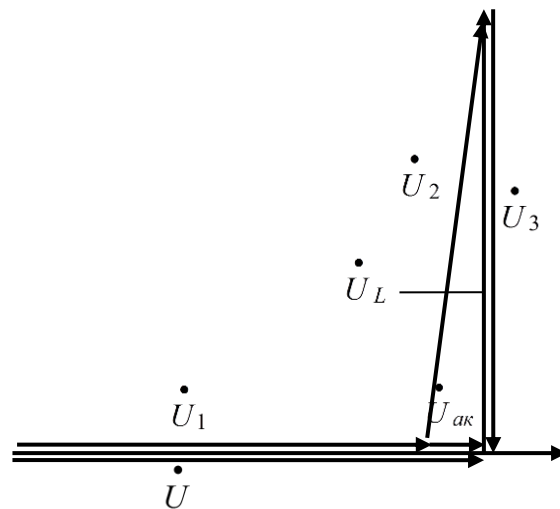


Рис. 9.4

Задача 9.3.

Для определения электрических параметров параллельного соединения реостата и конденсатора в цепь переменного тока с частотой $f = 50 \text{ Гц}$ были подсоединены вольтметр, ваттметр и амперметры (рис.9.5). Приборы дали следующие показания:

$$P = 100 \text{ Вт}, I = 1,49 \text{ А}, I_1 = 1 \text{ А}, I_2 = 1 \text{ А}.$$

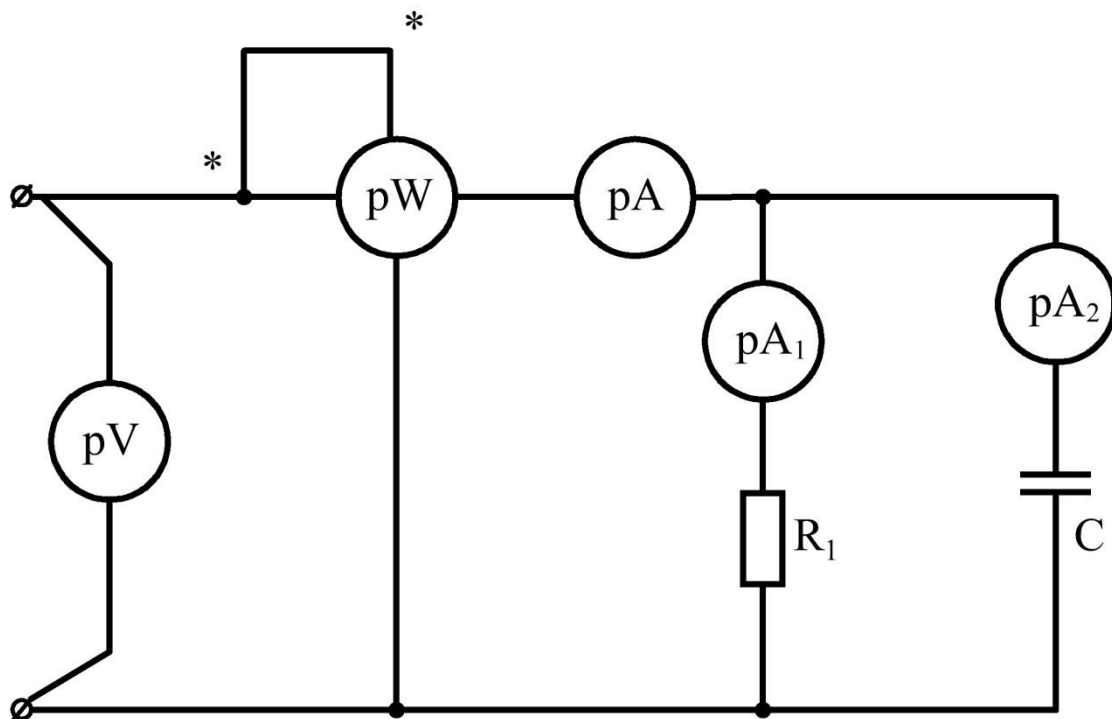


Рис. 9.5

Определить активную, емкостную и полную проводимости, емкость, активную, емкостную и полную мощности. Построить векторную диаграмму напряжения и токов, треугольник проводимостей и мощностей.

Решение

1. Проводимости электрической цепи и треугольник проводимостей.

Активная проводимость первой ветви

$$g_1 = \frac{1}{r_1} = \frac{I_1}{U} = \frac{1}{100} = 0,01 \text{ См.}$$

Емкостная проводимость второй ветви

$$b_C = \frac{I_2}{U} = \frac{1}{100} = 0,01 \text{ См.}$$

Полная проводимость электрической цепи

$$y = \frac{I}{U} = \sqrt{g_1^2 + b_C^2} = \frac{1,49}{100} = \sqrt{0,01^2 + 0,01^2} = 0,0149 \text{ См.}$$

2. Емкость конденсатора

$$C = \frac{b_C}{2\pi f} = \frac{0,01}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0000318 = 31,8 \text{ мкФ.}$$

3. Мощности и треугольник мощностей.

Активная

$$P = I_1^2 r_1 = U^2 g = 100 \text{ Вт.}$$

Емкостная

$$Q_C = I_2^2 x_C = U^2 b_C = 100^2 \cdot 0,01 = 100 \text{ Вар.}$$

Полная

$$S = U^2 y = UI = 100 \cdot 1,49 = 149 \text{ ВА.}$$

4. Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{100}{149} = 0,74.$$

5. Векторная диаграмма напряжения и токов (рис.9.6).

Масштаб по току: $m_I = 0,2 \text{ А/см}$. Вектор \dot{I}_1 совпадает с \dot{U} (активный ток), \dot{I}_2 опережает \dot{U} на угол 90 градусов (емкостный ток). Вектор общего тока:

$$\begin{aligned}\dot{I} &= \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \dot{U} g_1 + j\dot{U} b_C = \\ &= 100 \cdot 0,01 = 1 + j1 \text{ A.}\end{aligned}$$

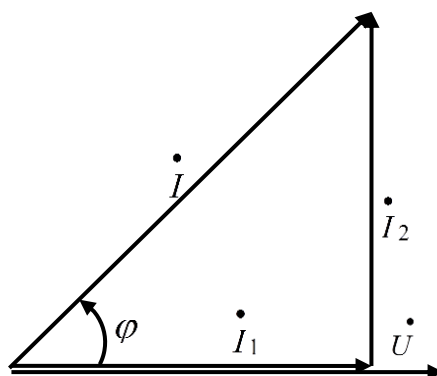


Рис. 9.6

Задача 9.4.

К цепи, состоящей из последовательно соединенных активного сопротивления $R = 3 \text{ Ом}$, индуктивности $L = 8 \text{ мГн}$ и емкости $C = 15 \text{ мкФ}$ подключено напряжение $U = 20 \text{ В}$ с частотой $f = 500 \text{ Гц}$. Найти ток, напряжение на каждом элементе цепи и мощность, расходуемую в ней. Построить векторную диаграмму.

Ответ. $I = 4 \text{ А}$; $U_R = 12 \text{ В}$; $U_L = 101 \text{ В}$; $U_C = 85 \text{ В}$; $P = 48 \text{ Вт}$.

Задание 9.5.

В схеме на рис.9.7 при напряжении $U = 100 \text{ В}$ и частоте $f = 50 \text{ Гц}$ активная мощность $P = 100 \text{ Вт}$, а реактивные $Q_L = 200 \text{ ВАр}$, $Q_C = 400 \text{ ВАр}$. Каковы будут эти же мощности при напряжении $U = 200 \text{ В}$ и частоте $f = 100 \text{ Гц}$?

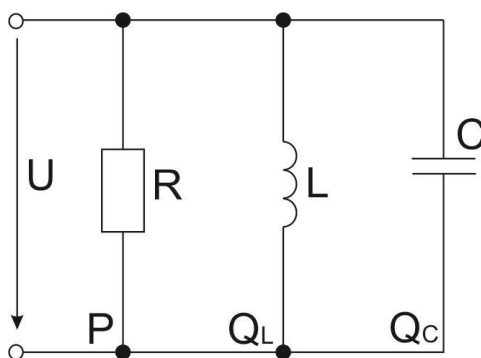


Рис. 9.7

Ответ: $P = 400 \text{ Вт}$, $Q_L = 400 \text{ ВАр}$, $Q_C = 3200 \text{ ВАр}$

Контрольные вопросы:

1. Как рассчитывается емкостное сопротивление?

2. Как рассчитывается полное сопротивление?
3. Запишите закон Ома для амплитудных и действующих значений напряжения и тока для емкостного элемента.
4. Чему равен угол сдвига фаз между напряжением и током на емкостном элементе?
5. Как определяется мощность емкостного элемента?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузовкин, В. А. Электротехника и электроника [Электронный ресурс]. – Москва: Юрайт, 2018. – 431 с. – Режим доступа: <https://biblio-online.ru/book/elektrotehnika-i-elektronika-423620>.
2. Гальперин, М. В. Электротехника и электроника. – Москва: НИЦ ИНФРА-М, 2019. – 480 с. – Режим доступа: <http://znanium.com/go.php?id=987378>.
3. Миленина, С. А. Электротехника. 2-е изд., пер. и доп. [Электронный ресурс]. – Москва: Юрайт, 2018. – 263 с. – Режим доступа: <https://biblio-online.ru/book/elektrotehnika-415282>.
4. Лунин, В. П. Электротехника и электроника в 3 т. Том 1. электрические и магнитные цепи. 2-е изд., пер. и доп. [Электронный ресурс]. – Москва: Юрайт, 2018. – 255 с. – Режим доступа: <https://biblio-online.ru/book/elektrotehnika-i-elektronika-v-3-t-tom-1-elektricheskie-i-magnitnye-cep-i-425470>.
5. Киселев, В. И. Электротехника и электроника в 3 т. Том 2. электромагнитные устройства и электрические машины 2-е изд., пер. и доп. [Электронный ресурс]. – Москва: Юрайт, 2018. – 184 с. – Режим доступа: <https://biblio-online.ru/book/elektrotehnika-i-elektronika-v-3-t-tom-2-elektromagnitnye-ustroystva-ielektricheskie-mashiny-425471>.
6. Славинский, А. К. Электротехника с основами электроники. – Москва: НИЦ ИНФРА-М, 2019. – 448 с. – Режим доступа: <http://znanium.com/go.php?id=989315>.
7. Миленина, С. А. Электротехника, электроника и схемотехника. 2-е изд., пер. и доп. [Электронный ресурс]. – Москва: Юрайт, 2018. – 406 с. – Режим доступа: <https://biblio-online.ru/book/elektrotehnikaelektronika-i-shemotehnika-413623>.