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
И. П. Маслов, Т. М. Черникова

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Методические указания к практическим занятиям
и самостоятельной работк для студентов специальности СПО
27.02.07 Управление качеством продукции, процессов и услуг
(по отраслям)

Рекомендованы цикловой методической комиссией
общепрофессиональных дисциплин
в качестве электронного издания для использования
в образовательном процессе

Кемерово 2019

Рецензенты:

Захаров С. А. – доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения горных и промышленных предприятий ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»

Маслов Иван Петрович
Черникова Татьяна Макаровна
Электротехника: методические указания к практическим занятиям и самостоятельной работе [Электронный ресурс] для студентов специальности СПО 27.02.07 Управление качеством продукции, процессов и услуг (по отраслям) / сост. И. П. Маслов, Т. М. Черникова; КузГТУ. – Электрон. издан. – Кемерово, 2019.

Приведено содержание практических занятий и выполнению самостоятельной работы, материал, необходимый для успешного изучения дисциплины.

Назначение издания – помощь студентам в получении знаний по дисциплине «Электротехника» и организация практических работ и выполнению самостоятельной работы.

© КузГТУ, 2019,
© И. П. Маслов,
Т. М. Черникова,
составление, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 4
Основные теоретические положения 5
Занятие 1. Исследование последовательного и параллельного соединения конденсаторов 8
Занятие 2. Исследование магнитного поля и свойств магнита 10
Занятие 3. Исследование параметров цепей переменного тока. Постоянные и переменные напряжения. Параметры синусоидальных сигналов. Среднеквадратичные величины напряжения и тока 19
Список литературы 27

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Электротехника» состоит из лекционных, лабораторных и практических занятий. На практических занятиях предусмотрено решение задач с целью лучшего усвоения теоретических знаний и получения навыков расчета задач, с которыми будущие специалисты могут встретиться в своей практической деятельности.

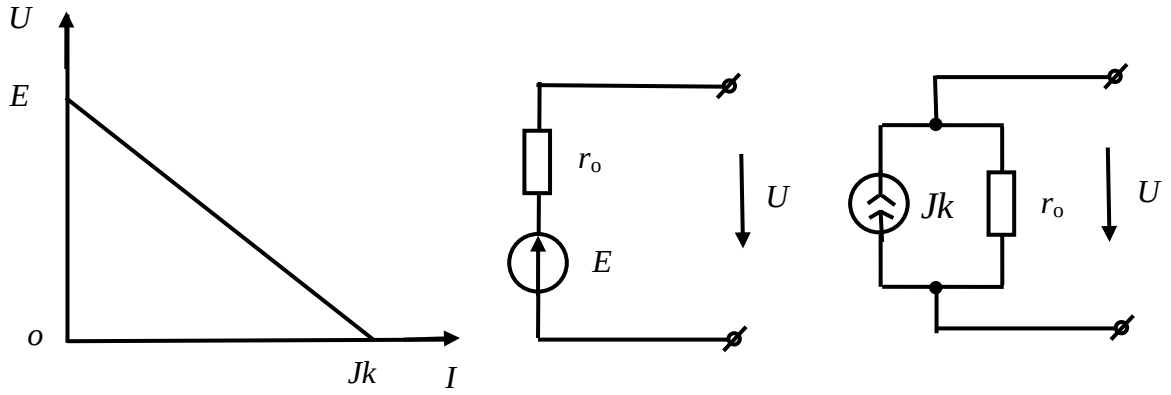
Методические указания содержат краткие теоретические положения, охватывающие основные разделы теоретического курса: линейные цепи постоянного тока, электромагнетизм, линейные цепи переменного тока. Методические указания рассчитаны на студентов, уже проработавших соответствующие разделы курса.

В ходе решения задач не следует изменять однажды принятые направления токов и наименования узлов, сопротивлений.

Основные теоретические положения

1. Электрические цепи состоят их 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. 1.1, а), может быть представлен в виде любой из двух эквивалентных схем: схемы из последовательного включения ЭДС и внутреннего (входного) сопротивления источника (рис. 1.1, б) и схемы из параллельно включенных источников тока и внутреннего (входного) сопротивления источника (рис. 1.1, б). Величина ЭДС *E* в схеме (рис. 1.1, б) численно равна напряжению на зажимах источника в режиме холостого хода (при отключенной нагрузке), а ток источника $J_к$ в схеме (рис. 1.1, в) численно равен току короткого замыкания источника.



а б в

Рис. 1.1

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

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

4. При расчетах электрических цепей пользуются понятиями идеализированных источников: источников ЭДС и источников тока. У источника ЭДС внутреннее сопротивление r_o=0, а у источника тока r_o=∞. 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

$$I = \frac{\Sigma \mathrm{E}}{\Sigma R},$$

где ΣE – 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; ΣR – арифметическая сумма сопротивлений цепи (в том числе внутренних сопротивлений источников ЭДС).

Для отдельной ветви без источника ЭДС в сложной электрической цепи

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

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. 1.2).

Для ветви с источниками ЭДС

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

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.

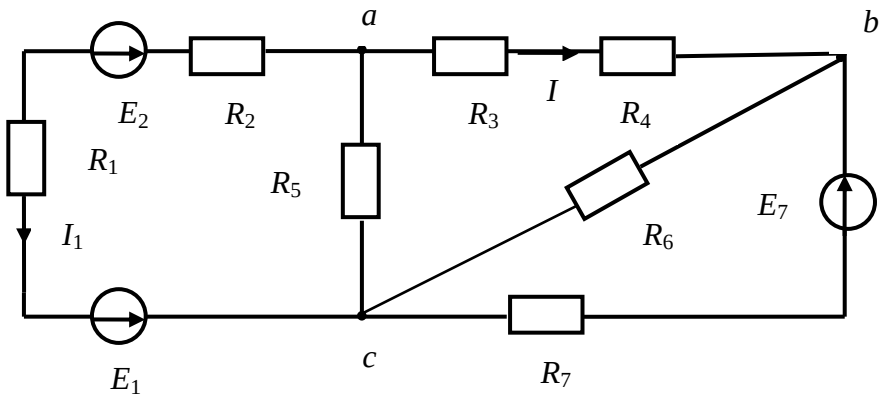


Рис. 1.2

Для ветви *ac* (рис. В.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

$$\frac{1}{R_э} = \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{R_k}.$$

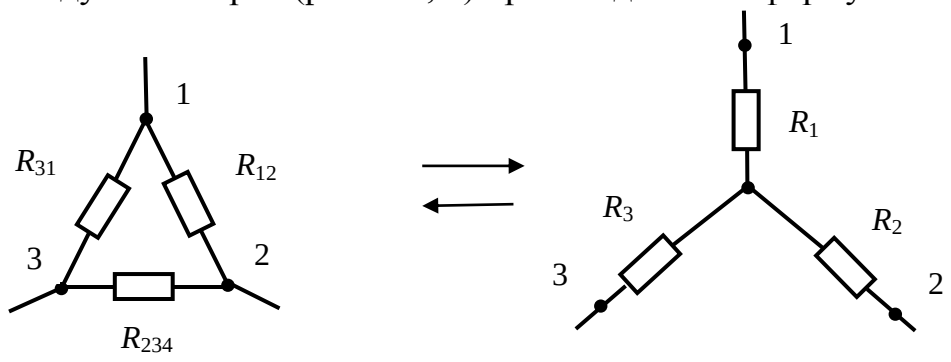
В частом случае параллельного соединения двух сопротивлений

$$R_э = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$$

При параллельном соединении трех сопротивлений

$$R_Э = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3};$$

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



а б

Рис. 1.3

$$\left.\begin{aligned} R_1 &= \frac{R_{31}R_{12}}{R_{12}+R_{23}+R_{31}} \\ R_2 &= \frac{R_{12}R_{23}}{R_{12}+R_{23}+R_{31}} \\ R_3 &= \frac{R_{23}R_{31}}{R_{12}+R_{23}+R_{31}} \end{aligned}\right\}_{\Delta\to Y} \qquad \left.\begin{aligned} R_{12} &= R_1 + R_2 + \frac{R_1R_2}{R_3} \\ R_{23} &= R_2 + R_3 + \frac{R_2R_3}{R_1} \\ R_{31} &= R_3 + R_1 + \frac{R_3R_1}{R_2} \end{aligned}\right\}_{Y\to\Delta}$$

9. При определении токов в разветвленных цепях (рис. 1.4) полезно пользоваться формулой разброса токов в параллельных ветвях

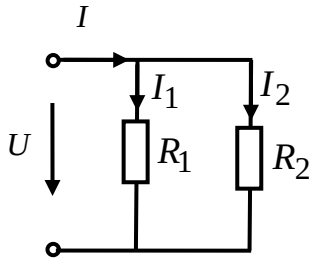


Рис. 1.4

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

10. Мощность цепи постоянного тока P определяется из выражения

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

11. Коэффициент полезного действия η цепи постоянного тока

$$\eta = \frac{P_{полез}}{P_{полн}} \cdot 100\%,$$

где $P_{полез}$, $P_{полн}$ – полезная и полная мощность соответственно.

Занятие 1. Исследование последовательного и параллельного соединения конденсаторов

Цель: научиться рассчитывать последовательное и параллельное соединение конденсаторов

Основные теоретические положения

Система, состоящая из двух проводников, разделенных диэлектриком, называется конденсатором, а проводники – обкладками.

Величина C, равная отношению заряда q одной из обкладок конденсатора к напряжению U между ними, называется электрической емкостью конденсатора

$$C = \frac{q}{U}.$$

При последовательном соединении конденсаторов общая (эквивалентная) емкость определяется по формуле

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \ldots$$

При параллельном соединении конденсаторов эквивалентная емкость

$$C = C_1 + C_2 + C_3 ...$$

Энергия электрического поля конденсатора

$$W_C = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2}.$$

Задача 1.1.

Определить эквивалентную емкость двух конденсаторов при последовательном и параллельном соединении их: C_1=2 мкФ, C_2=4 мкФ.

Решение.

Эквивалентная емкость при последовательном соединении конденсаторов

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{2 \cdot 4}{2 + 4} = 1{,}33\,\text{мкФ}$$

Эквивалентная емкость при параллельном соединении конденсаторов

$$C = C_1 + C_2 = 2 + 4 = 6\,\text{мкФ}.$$

Ответ: C= 6 мкФ

Задача 1.2.

Определить энергию, запасенную в электрическом поле конденсатора емкостью 10 мкФ, если напряжение на конденсаторе 300 В.

Решение.

Энергия электрического поля

$$W_C = \frac{CU^2}{2} = \frac{10 \cdot 10^{-6} \cdot 300^2}{2} = 0{,}45\,\text{Дж}.$$

Задача 1.3.

Емкость каждого конденсатора, изображенного на рис. 1.5 равна C. Определить эквивалентную емкость соединения.

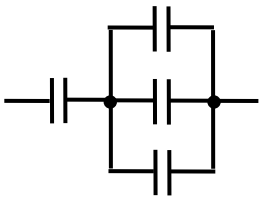


Рис. 1.5

Ответ: 0,75C.

Задача 1.4.

Определить общую емкость пяти параллельно включенных конденсаторов емкостью 3 мкФ каждый.

Ответ: 15 мкФ.

Контрольные вопросы

1. Чему равна емкость конденсатора?
2. Как определяется эквивалентная емкость при последовательном соединении конденсаторов?
3. Как определяется эквивалентная емкость при параллельном соединении конденсаторов?

Занятие 2. Исследование магнитного поля и свойств магнита

Цель: научится определять основные параметры магнитного поля.

Задача 2.1

Два длинных прямых параллельных провода находятся на расстоянии r = 5 см один от другого. По проводам текут токи $I_1 = I_2$ = 10 А. Найти магнитную индукцию в точке А, находящейся на расстоянии r_1 = 4 см от первого проводника и r_2 = 3 см от второго, рис. 2.1 и 2.2.

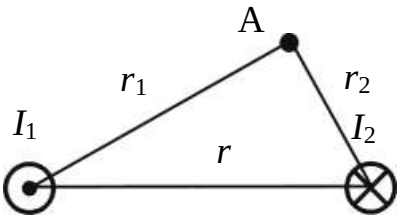


Рис. 2.1

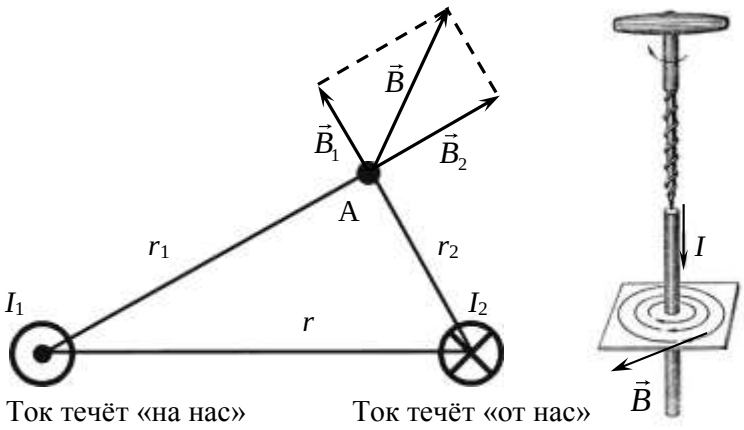


Рис. 2.2

Решение.

Магнитная индукция в точке А складывается из магнитных индукций токов I_1 и I_2 в этой точке:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2.$$

Длинный прямой провод, по которому протекает ток I, создаёт вокруг себя магнитное поле на расстоянии R индукцией:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R},$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная. Направление вектора магнитной индукции в этом случае может быть определено по правилу буравчика: если поступательное движение буравчика (правого винта) направлено в сторону тока, то вращательное движение – по направлению магнитных силовых линий. Вектор магнитной индукции направлен по касательной к магнитной силовой линии.

Треугольник со сторонами 3, 4, 5 см является прямоугольным, поэтому угол между векторами $\vec{B}_1$ и $\vec{B}_2$ составляет 90°. Тогда, для сложения векторов можно воспользоваться теоремой Пифагора:

$$B = \sqrt{\left(\frac{\mu_0 I_1}{2\pi r_1}\right)^2 + \left(\frac{\mu_0 I_2}{2\pi r_2}\right)^2} = 8,33 \cdot 10^{-5} \text{ Тл.}$$

Ответ: $B = 83,3$ мкТл.

Задача 2.2.

Проволочная рамка расположена в одной плоскости с длинным прямым проводом так, что две её стороны параллельны проводу, рис. 2.3. Определить равнодействующую силу, действующую на рамку. I_1 = 4 А, I_2 = 2 А, a = 15 см, b = 10 см, c = 8 см.

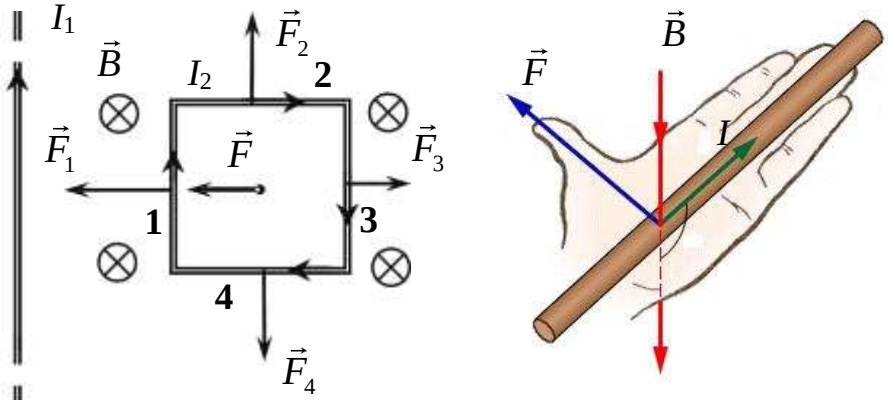


Рис. 2.3

Решение.

Ток I_1 создаёт магнитное поле, которое действует на рамку с током. Определим по правилу буравчика, что магнитная индукция $\vec{B}$ направлена «от нас». На каждую из сторон рамки действует сила Ампера. Её направление можно определить с помощью правила левой руки: расположим левую руку так, чтобы магнитные силовые линии входили в ладонь, четыре пальца левой руки нужно ориентировать в направлении тока, а отогнутый на 90º большой палец левой руки будет направлен вдоль силы Ампера, действующей на проводник с током. Силы $\vec{F}_2$ и $\vec{F}_4$ равны по модулю и противоположны по направлению, поэтому они компенсируют друг друга.

Определим силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_3$. Они направлены в противоположные стороны, но не равны по модулю, так как одна из сторон находится ближе к источнику магнитного поля, чем другая. Магнитная индукция длинного прямолинейного проводника с током I на расстоянии r от него определяется по формуле:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}.$$

Если прямолинейный проводник с током I имеет длину l и находится в однородном магнитном поле с индукцией B, направленной под углом □ к направлению тока, то него действует сила Ампера, равная по модулю:

$$F_{\text{А}} = I \cdot B \cdot l \cdot \sin\alpha.$$

Применяя формулы получаем:

$$F_1 = I_2 \cdot B_1 \cdot c = I_2 \cdot \frac{\mu_0 I_1}{2\pi a} \cdot c = 8{,}53 \cdot 10^{-7} \text{ Н};$$

$$F_3 = I_2 \cdot B_2 \cdot c = I_2 \cdot \frac{\mu_0 I_1}{2\pi(a+b)} \cdot c = 5{,}12 \cdot 10^{-7} \text{ Н};$$

Равнодействующая сила $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_3$ по модулю равна $F = F_1 - F_3$.

Ответ: $F = 3{,}41 \cdot 10^{-7}$ Н.

Задача 2.3.

Провод в виде полукольца радиусом R = 0,2 м находится в однородном магнитном поле с индукцией B = 0,01 Тл, рис. 2.4. По проводу течет ток I = 4 А. Найти силу, действующую на провод, если он лежит в плоскости, перпендикулярной линиям индукции.

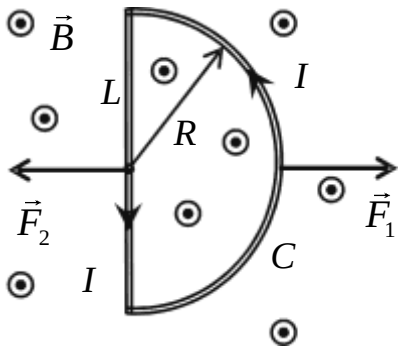


Рис. 2.4

Решение.

Полукольцо C – это незамкнутый контур, и на каждый элемент контура с током $d\vec{l}$ действует сила Ампера:

$$d\vec{F}_{\text{A}} = I \cdot \left[d\vec{l}, \vec{B} \right].$$

Равнодействующая всех сил может быть определена путём интегрирования:

$$\vec{F}_1 = \int_C d\vec{F}_{\text{A}}.$$

Однако, учитывая, что провод находится в <u>однородном</u> магнитном поле, эту силу можно определить без применения интегрирования по элементам. Дополним полукольцо C прямолинейным проводником L. Тогда, получится замкнутый контур, по которому протекает ток I. Известно, что сила Ампера, действующая на замкнутый контур с током в однородном магнитном поле, равна нулю. Значит,

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = 0; \qquad \vec{F}_1 = -\vec{F}_2.$$

Применяя закон Ампера для прямолинейного проводника L, получаем

Ответ: $F_1 = F_2 = I \cdot B \cdot 2R = 0{,}016$ Н.

Задача 2.4.

Рамка гальванометра, рис. 2.5, содержащая N = 200 витков тонкого провода, подвешена на упругой нити. Площадь рамки S = 20 см^2. Плоскость рамки параллельна линиям магнитной индукции B = 0,3 Тл. Когда через гальванометр был пропущен ток I = 1 мА, то рамка повернулась на угол α = 30°. Найти постоянную кручения нити C.

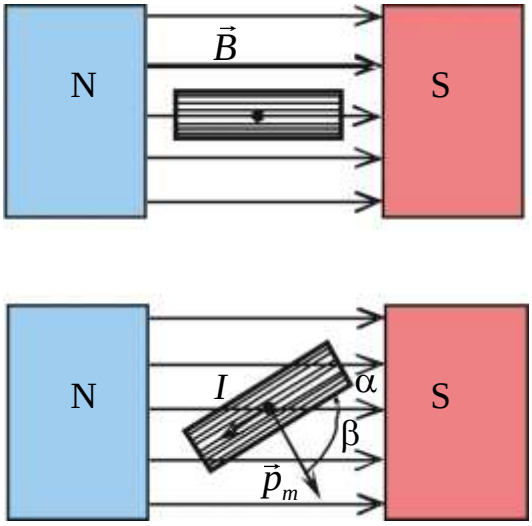


Рис. 2.5

Решение.

Если ток через гальванометр не протекает, то его рамка будет ориентирована, как показано на рисунке сверху. Когда электрический ток проходит по проводу, намотанному на рамку гальванометра, то возникает момент силы Ампера M_A, который поворачивает рамку до тех пор, пока он не уравновесится моментом сил упругости $M_{упр}$, возникающим в нити при закручивании на угол α, как показано на рисунке снизу. Момент силы Ампера определяется по формуле:

$$M_A = p_m B \sin\beta,$$

где $p_m = ISN$ – магнитный момент контура, содержащего N витков, β – угол между магнитным моментом контура и вектором магнитной индукции поля, в котором находится контур: β = 90º – α = 60º. Момент силы упругости пропорционален углу закручивания нити:

$$M_{упр} = C \cdot \alpha,$$

где C – постоянная кручения нити. Если установилось равновесие рамки с током, то $M_{упр} = M_A$. Подставляя в это уравнение, получаем:

$$C\alpha = p_m B \sin\beta;$$

$$C = \frac{ISNB\sin\beta}{\alpha} = \frac{10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 200 \cdot 0,3 \cdot 0,866}{30°} = 3,46 \cdot 10^{-6}\ \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{град}}.$$

Ответ: $C = 3,46 \cdot 10^{-6}\ \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{град}}$.

Задача 2.5.

Протон, прошедший ускоряющую разность потенциалов U = 600 В, влетел в однородное магнитное поле с индукцией B = 0,3 Тл и начал двигаться по окружности, рис. 2.6. Вычислить её радиус.

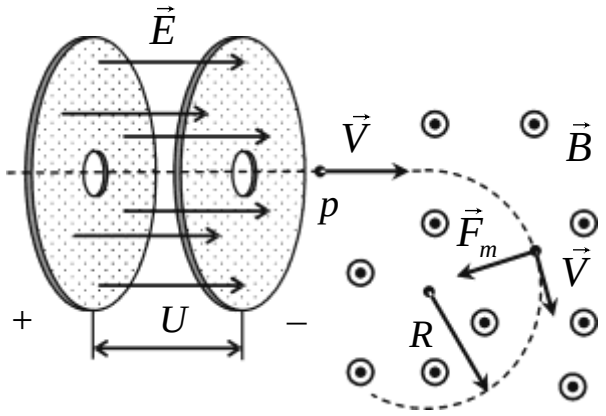


Рис. 2.6

Решение.

Когда протон проходит ускоряющую разность потенциалов U, на него действует электрическая составляющая силы Лоренца (электростатическая сила) $\vec{F}_e = q\vec{E}$, которая совершает положительную работу и, частица получает скорость V.

$$\frac{mV^2}{2} = Ue,$$

где m и e – масса и заряд протона. Отсюда:

$$V = \sqrt{\frac{2Ue}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 600\ \text{В} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}\ \text{Кл}}{1,67 \cdot 10^{-27}\ \text{кг}}} = 3,39 \cdot 10^5\ \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Затем, протон попадает в однородное магнитное поле и начинает двигаться по окружности. Магнитная составляющая силы Лоренца $\vec{F}_m$ всегда направлена перпендикулярно скорости движения частицы, и поэтому работу не совершает. Направление скорости частицы при движении в магнитном поле изменяется, а величина её скорости не изменяется. Чтобы протон начал двигаться по окружности, магнитная индукция должна быть направлена перпендикулярно скорости движения. Направление магнитной составляющей силы Лоренца определяем по правилу левой руки: левую руку располагаем так, чтобы вектор магнитной индукции входил в ладонь, четыре пальца направим вдоль направления движения заряда, отогнутый на 90º большой палец левой руки показывает направление силы Лоренца, действующей на <u>положительный</u> заряд. Если заряд отрицательный, то направление действия силы Лоренца изменяем на противоположное. Магнитная составляющая силы Лоренца определяется по формуле:

$$\vec{F}_m = q \cdot \left[\vec{V}, \vec{B}\right] \quad \Rightarrow \quad F_m = qVB\sin\alpha,$$

α – угол между скоростью частицы $\vec{V}$ и вектором магнитной индукции $\vec{B}$. В условиях нашей задачи α = 90º, а $q = e = 1,6 \times 10^{-19}$ Кл. По II закону Ньютона:

$$\vec{a} = \vec{F}_m / m; \qquad a = V^2 / R; \qquad F_m = eVB.$$

После преобразования выражений получаем:

$$R = \frac{mV}{eB} = 0,0118\ \text{м}.$$

Ответ: $R = 1,18$ см.

Задача 2.6.

Скорость самолёта равна V = 950 км/ч. Найти разность потенциалов Δφ, возникающую между концами крыльев самолёта, рис. 2.7, если вертикаль-

ная составляющая индукции земного магнитного поля равна $B = 3\times10^{-5}$ Тл, а размах крыльев самолёта $L = 12{,}5$ м.

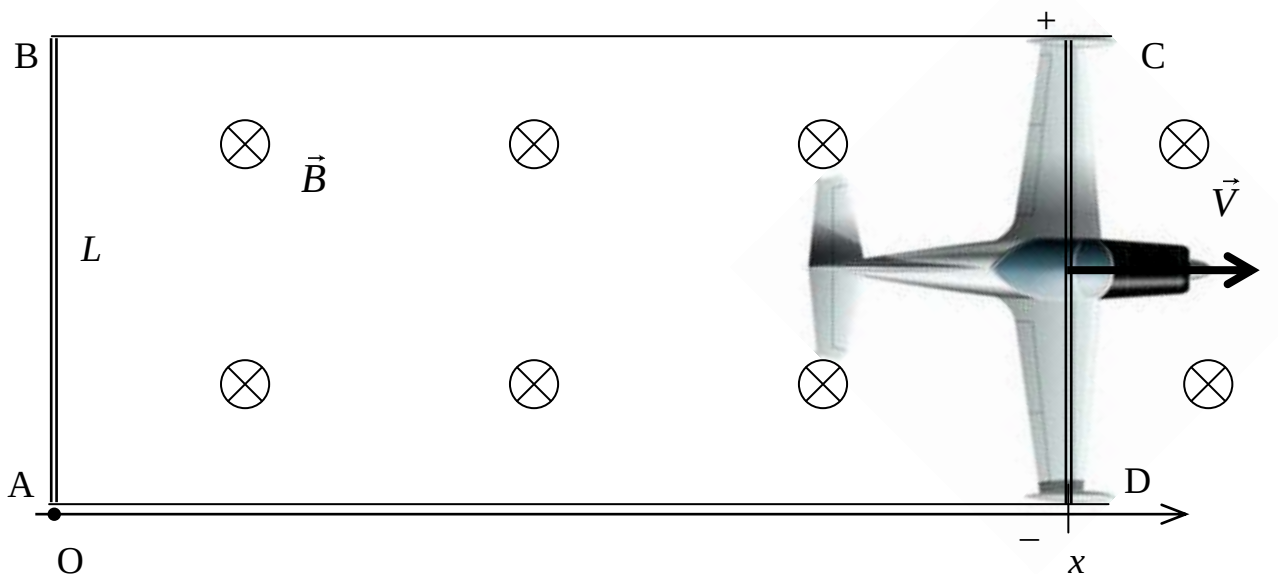


Рис. 2.7

Решение.

Самолёт летит со скоростью V вдоль оси OX. Его текущая координата – x. Площадь, ограниченная контуром ABCD непрерывно растёт, значит, магнитный поток через этот контур также растёт: $\Phi(t) = B\times Lx$. Поэтому в этом контуре, согласно закону электромагнитной индукции, появится ЭДС, которая приведёт к возникновению разности потенциалов на концах крыльев:

$$\Delta\varphi = |\mathcal{E}| = \left|\frac{d\Phi}{dt}\right| = BL\frac{dx}{dt} = BLV = 0{,}1\,\text{В}.$$

Ответ: $\Delta\varphi = 0{,}1$ В.

Задача 2.7.

Проволочное кольцо радиусом $r = 10$ см лежит на столе. Какой заряд Q протечёт по кольцу, если его повернуть с одной стороны на другую? Сопротивление кольца R равно 1 Ом. Вертикальная составляющая индукции B магнитного поля Земли равна 50 мкТл.

Решение.

Через площадь, ограниченную проволочным кольцом, проходит магнитный поток $\Phi_1 = B\times\pi r^2$. Если кольцо повернуть на другую сторону, то магнитный поток изменит знак на противоположный: $\Phi_2 = -\Phi_1$. По мере того как кольцо поворачивают, магнитный поток, пронизывающий его, изменяется. Это приводит к появлению ЭДС индукции:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Вследствие этого в кольце возбуждается индукционный ток:

$$I = \frac{\mathcal{E}_i}{R} = \frac{dq}{dt}.$$

Используя (2.1) и (2.2), выводим дифференциальное уравнение и решаем его:

$$-\frac{1}{R}\frac{d\Phi}{dt} = \frac{dq}{dt}; \qquad dq = -\frac{1}{R}d\Phi; \qquad \int_0^Q dq = -\frac{1}{R}\int_{\Phi_1}^{\Phi_2} d\Phi;$$

$$Q = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{R} = \frac{B\cdot\pi r^2 - \left(-B\cdot\pi r^2\right)}{R} = \frac{2\pi r^2 B}{R} = 3{,}14\cdot 10^{-6}\ \text{Кл}.$$

Ответ: Q = 3,14 мкКл.

Задача 2.8.

На рамку площадью S = 200 см^2 намотано N = 100 витков провода, рис. 2.8. Она равномерно вращается с частотой n = 10 об/с относительно оси, лежащей в плоскости рамки и перпендикулярно линиям индукции магнитного поля (B = 0,2 Тл). Найти максимальную ЭДС индукции, возникающую в проводе. Определить максимальный индукционный ток, если сопротивление провода R = 5 Ом.

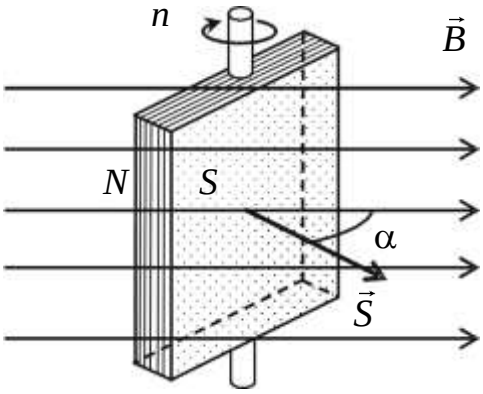


Рис. 2.8

Решение.

Магнитный поток, пронизывающий рамку, на которую намотан провод, изменяется во времени из-за поворота рамки:

$$\Phi(t) = BSN\cos\alpha(t) = BSN\cos\omega t = BSN\cos(2\pi nt).$$

Поэтому в рамке возникает ЭДС индукции:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt} = 2\pi nBSN\sin(2\pi nt).$$

Отсюда следует, что максимальная ЭДС индукции, возникающая в рамке, равна:

$$\mathcal{E}_{i\max} = 2\pi nBSN = 0,251\,\text{В}.$$

Тогда, максимальный индукционный ток:

$$I_{\max} = \frac{\mathcal{E}_{i\max}}{R} = 5,02\cdot 10^{-2}\ \text{А}.$$

Ответ: $\mathcal{E}_{i\max} = 0,251\,\text{В}$; $I_{\max} = 50,2\ \text{мА}$.

Задача 2.9.

Два длинных параллельных провода находятся на расстоянии r = 5 см один от другого (рис. 2.1). По проводам текут токи $I_1 = I_2 = 10$ А. Найти магнитную индукцию в точке А, находящейся на расстоянии r_1 = 3 см от первого проводника и r_2 = 3 см от второго.

Задача 2.10.

Прямоугольная проволочная рамка расположена в одной плоскости с длинным прямым проводом (рис. 2.3) так, что её большая сторона a = 2 см параллельна проводу. Другая сторона рамки в 2 раза меньше. По рамке и проводу текут одинаковые токи силой $I_1 = I_2 = 1$ кА. Определить силу, действующую на рамку, и показать её направление, если ближайшая к проводу сторона рамки находится на расстоянии равном a/3.

Задача 2.11.

Провод в виде 1/4 части кольца радиусом R = 20 см находится в однородном магнитном поле с индукцией B = 2 Тл. По проводу течёт ток I = 30 А. Найти силу, действующую на провод, если он лежит в плоскости, перпендикулярной линиям индукции.

Задача 2.12.

По катушки из тонкой проволоки течет ток I = 15 А. Площадь поперечного сечения катушки S = 30 см^2, число витков в ней N = 10. Катушка помещена в однородное магнитное поле с индукцией B = 0,1 Тл. Определить магнитный момент p_m катушки и вращающий момент M, действующий на неё со стороны поля, если ось катушки составляет угол α=30º с линиями индукции.

Задача 2.13.

Два иона, имеющие одинаковый заряд, но различные массы, влетели в однородное магнитное поле. Первый ион начал двигаться по окружности радиусом R_1 = 5 см, второй ион – по окружности радиусом R_2 = 2,5 см. Найти отношение масс ионов m_1/m_2, если они прошли одинаковую ускоряющую разность потенциалов.

Задача 2.14.

Заряженная частица, двигаясь перпендикулярно скрещенным под прямым углом электрическому (E = 400 кВ/м) и магнитному (B = 0,25 Тл) полям, не испытывает отклонения при определённой скорости. Определить эту скорость.

Задача 2.15.

По длинному прямому проводу течёт ток. Вблизи провода расположена квадратная рамка из тонкого провода сопротивлением R = 1 Ом. Провод лежит в плоскости рамки и параллелен двум её сторонам длиной L = 5 см, расстояние до которых от провода соответственно равны a = 2 см и b = 4 см. Найти силу тока в проводе, если при его выключении через рамку протёк заряд Q = 3 мкКл.

Задача 2.16.

Короткая катушка, содержащая N = 1000 витков, равномерно вращается в однородном магнитном поле с индукцией B = 0,4 Тл с угловой скоростью ω = 5 рад/с относительно оси, совпадающей с диаметром катушки и перпендикулярной линиям индукции. Определить мгновенное значение ЭДС индукции для тех моментов времени, когда плоскость катушки составляет угол $\alpha = 60^{\circ}$ с линиями индукции. Площадь катушки равна S = 100 см^2.

Контрольные вопросы

1. Как определить направление и величину магнитной индукции в пространстве экспериментальными методами?
2. В каких единицах измеряется магнитная индукция в системе СИ?
3. Что такое сила Ампера?
4. Сформулируйте закон Ампера.
5. Как определить силу Ампера, действующую на проводник с током про-извольной формы?
6. Чему равна сила Ампера, действующая на замкнутый контур с током в однородном магнитном поле?
7. Что такое магнитный момент контура с током? Как определить его направление?

Занятие 3. Исследование параметров цепей переменного тока. Постоянные и переменные напряжения. Параметры синусоидальных сигналов. Среднеквадратичные величины напряжения и тока

Цель: приобретение навыков анализа и расчета цепей переменного тока.

Пример решения.

Находим величины реактивных сопротивлений:

$$X_L = \omega L = 2\pi f\, 10^{-3} = 314\, L10^{-3} \text{ Ом},$$
$$X_C = 1/\omega L = 1/(2\pi C10^{-6}) = 10^6/(314C) \text{ Ом},$$

где L – индуктивность, мГн, C – емкость, мкФ. Только в этих случаях допускается округление до целых чисел.

Расчет токов методом проводимостей

Находим величины реактивных сопротивлений в каждой ветви $X = X_L - X_C$. Если X(+), то характер результирующего реактивного сопротивления индуктивный, если X(–) – емкостный. В одной из ветвей возможен резонанс, условием которого является равенство реактивных сопротивлений $X_C = X_L$, при котором X = 0.

Рассмотрим пример (рис. 3.1).

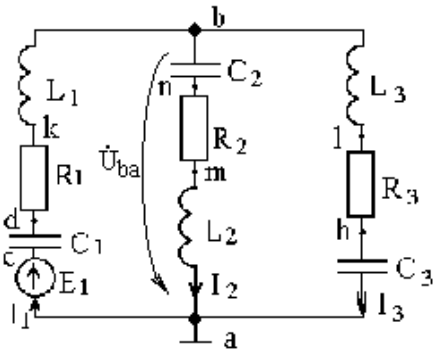


Рис. 3.1. Схема однофазной цепи переменного тока.

Составляем схему замещения, которая имеет вид, показанный на рис. 3.2.

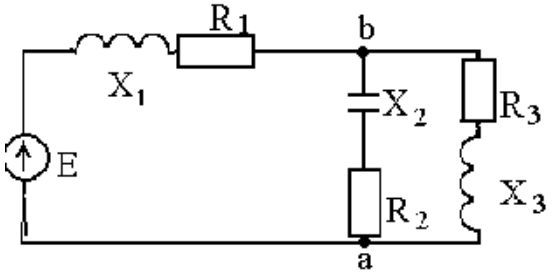


Рис. 3.2. Схема замещения.

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

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

Находим активные и реактивные проводимости параллельных ветвей. Параллельная ветвь 2 (X_2 – емкостный характер):

$g_2 = R_2 / (R_2^2 + X_2^2)$; $b_2 = -X_2 / (R_2^2 + X_2^2)$.

Параллельная ветвь 3 (X_3 – индуктивный характер):

$g_3 = R_3 / (R_3^2 + X_3^2)$; $b_3 = X_3 / (R_3^2 + X_3^2$

В результате преобразования схема будет иметь вид (рис. 3.3).

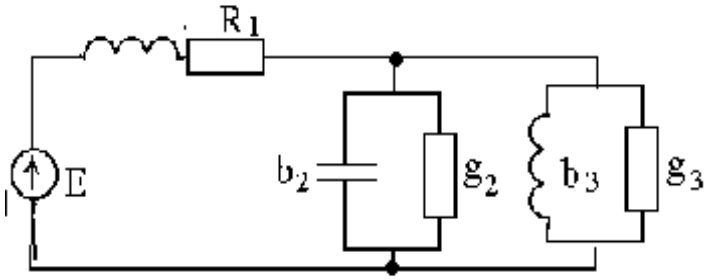


Рис. 3.3. Схема замещения после преобразования параллельных ветвей

$$Y_2 = \sqrt{g_2^2 + b_2^2};$$

$$Y_3 = \sqrt{g_3^2 + b_3^2}$$

Определяем эквивалентные проводимости двух ветвей (рис.3.4):

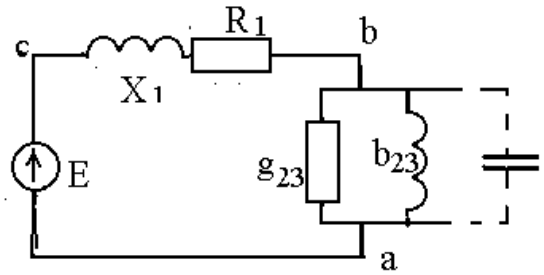


Рис. 3.4.

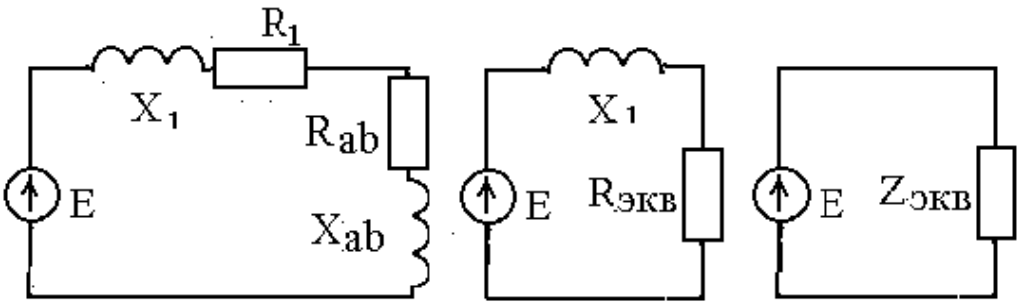
$$g_{23} = g_2 + g_3,$$
$$b_{23} = b_3 - b_2,$$
$$Y_{23} = \sqrt{g_{23} + {}_{323}} = Y_{ab}.$$

Характер проводимости b_{23} определяется по знаку b_{23}: при (+) характер индуктивный, при (–) – емкостный. Схема имеет вид, показанный на рис. 2.4.

На участке ab от проводимостей переходим к сопротивлениям, т.к. этот участок соединен последовательно с участком bc:

$$R_{ab} = g_{23} / Y_{23}^2, \qquad X_{ab} = b_{23} / Y_{23}^2.$$

При переходе к сопротивлениям схема замещения приобретает вид, представленный на рис. 3.5, а.



а б в

Рис. 3.5. Схемы замещения при переходе к сопротивлениям.

Определяем эквивалентное сопротивление схемы рис. 3.5, б и 3.5, в:

$R_{экв} = R_1 + R_{ab}$; $X_{экв} = X_1 + X_{ab}$; $Z_{экв} = \sqrt{R_{экв}^2 + X_{экв}^2}$;

$\varphi_{экв} = \mathrm{arctg}\,(X_{экв} / R_{экв})$.

Вычисляем ток I_1 первой ветви и источника по закону Ома, а также находим его активную I_{1a} и реактивную I_{1p} составляющие:

$I_1 = E / Z_{экв}$, $I_{1a}=I_1\cos\varphi_{экв}$, $I_{1P}=I_1\sin\varphi_{экв}$.

Определяем напряжение на параллельном участке ab, его полную U_{ab}, активную $U_{ab,p}$ и реактивную $U_{ab,p}$ составляющие:

$U_{ab,ак} = I_1R_{ab}$; $U_{ab,p} = I_1X_{ab}$; $U_{ab} = \sqrt{U_{ab,ак}^2 + U_{ab,p}^2}$.

Вычисляем токи и углы сдвига фаз φ между токами и напряжениями в параллельных ветвях:

$I_2 = Y_2U_{ab}$; $I_{2ак} = g_2U_{ab}$; $I_{2p} = b_2U_{ab}$; $I_2 = \sqrt{I_{2ак}^2 + I_{2p}^2}$;

$$\varphi_2 = arctg\,\frac{b_2}{g_2};$$

$I_3 = Y_3U_{ab}$; $I_{3ак} = g_3U_{ab}$; $I_{3p} = b_3U_{ab}$; $I_3 = \sqrt{I_{3ак}^2 + I_{3p}^2}$;

$$\varphi_3 = \mathrm{arctg}\,\frac{b_3}{g_3}.$$

Проверка по первому закону Кирхгофа:

$I_{1a} = I_{2a} + I_{3a}$; $I_{1p} = I_{2p} + I_{3p}$.

Значения модулей токов I_1, I_2, I_3 должны быть равны соответствующим значениям, полученным другими методами.

Символический метод расчета цепей синусоидального тока

Представляем полные комплексные сопротивления каждой ветви в алгебраической и показательной форме.

$\underline{Z} = R + j(X_L - X_C) = Ze^{\pm j\varphi}$,

где модуль сопротивления $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$, $\varphi = \mathrm{arctg}\,(X/ R)$.

Знак (+) соответствует индуктивному сопротивлению, а знак (–) – емкостному.

Обратные преобразования $Ze^{\pm j\varphi} = \pm Z\cos\varphi \pm jZ\sin\varphi$.

При каждом преобразовании обязательно представлять вектор на комплексной плоскости. Отсчет показателя степени угла φ производится против часовой стрелки, если φ – положительный; по часовой, если φ – отрицательный.

Комплексное сопротивление параллельного участка ab:

$$\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_2 \underline{Z}_3 / (\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3).$$

Эквивалентное сопротивление цепи при смешанном соединении (рис. 3.6, 3.7):

$$\underline{Z}_{экв} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{ab}.$$

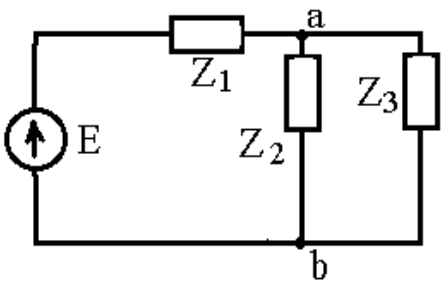


Рис. 3.6

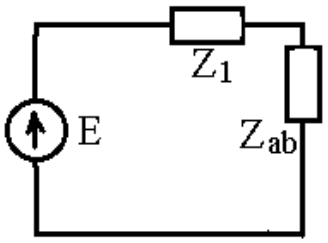


Рис. 3.7

Определяем комплексные токи в ветвях:

$$\dot{I}_1 = \dot{E} / \underline{Z}_{экв} = I_1 e^{\pm j\varphi} = I_{1a} \pm jI_{1p};$$

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_1 \underline{Z}_3 / (\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3) = I_2 e^{\pm j\varphi} = I_{2a} \pm jI_{2p};$$

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_1 \underline{Z}_2 / (\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3) = I_3 e^{\pm j\varphi} = I_{3a} \pm jI_{3p}.$$

Найденные значения токов должны быть представлены в алгебраической и показательной формах.

Проверяем правильность вычислений по первому закону Кирхгофа:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_3.$$

Находим напряжение на параллельном участке $\dot{U}_{ab} = \dot{I}_1 \underline{Z}_{ab}$, $\dot{U}_{ab} = \dot{I}_2 \underline{Z}_2$ или $\dot{U}_{ab} = \dot{I}_3 \underline{Z}_3$. Напряжение $\dot{U}_{ab}$ должно соответствовать $\dot{U}_{ab}$, найденному методом проводимостей.

Расчет методом узловых потенциалов

Определяем комплексные проводимости ветвей с точностью до четвертой значащей цифры (для схемы рис. 3.8).

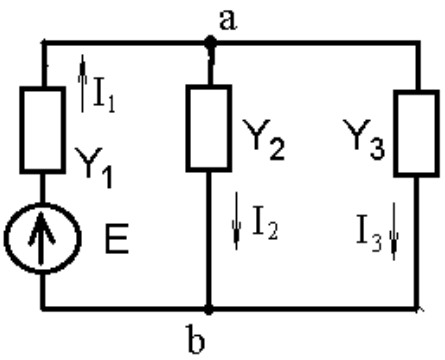


Рис. 3.8. Схема замещения с комплексными проводимостями ветвей

$$\underline{Y}_1 = 1 / (Z_1 e^{\pm j\varphi 1}) = Y_1 e^{\pm j\varphi 1} = \pm g_1 \pm jb_1 ,$$
$$\underline{Y}_2 = 1 / (Z_2 e^{\pm j\varphi 2}) = Y_2 e^{\pm j\varphi 2} = \pm g_2 \pm jb_2 ,$$
$$\underline{Y}_3 = 1 / (Z_3 e^{\pm j\varphi 3}) = Y_3 e^{\pm j\varphi 3} = \pm g_3 \pm jb_3 .$$

Выбираем направление токов I_1; I_2; I_3 .

Определяем напряжение U_{ab}:

$$\dot{U}_{ab} = \dot{E}_1 \underline{Y}_1 / (\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3) ;$$

Определяем токи в ветвях:

$$\dot{I}_1 = (\dot{E}_1 - \dot{U}_{ab}) / \underline{Z}_1; \quad \dot{I}_2 = \dot{U}_{ab} / \underline{Z}_2; \quad \dot{I}_3 = \dot{U}_{ab} / \underline{Z}_3 .$$

Выполняем проверку по первому закону Кирхгофа.

Баланс мощностей

Баланс мощностей определяется равенством $\tilde{S}_{ист} = \tilde{S}_{пр}$.

Мощность источников рассчитывается как:

$$\tilde{S}_{ист} = \overset{*}{I}_1 \dot{E} = P_{ист} \pm jQ_{ист},$$

где $\dot{I}_3$ – сопряженный комплекс тока (знак перед (j) изменяется на противоположный).

Мощность приемников равна:

$P_{пр} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3$; $Q_{пр} = \pm I_1^2 X_1 \pm I_2^2 X_2 \pm I_3^2 X_3$,

где I_1, I_2, I_3 – модули комплексов токов.

Активные и реактивные мощности источников и приемников так же равны между собой:

$$P_{ист} = P_{пр}; \qquad Q_{ист} = Q_{пр}.$$

Погрешность вычислений не должна превышать 2 %.

Построение векторной диаграммы

Находим напряжение на каждом элементе схемы и строим векторную диаграмму (для схемы на рис. 3.1), представляющую собой графиче-

ское изображение первого и второго законов Кирхгофа на комплексной плоскости.

Комплексные напряжения на участках цепи по закону Ома:

$$\dot{U}_{ac} = \dot{E}_1; \dot{U}_{nb} = \dot{I}_2 X_{C2} e^{-j90^\circ}; \ \dot{U}_{lb} = \dot{I}_3 X_{L3} e^{j90^\circ};$$

$$\dot{U}_{cd} = \dot{I}_1 X_{C1} e^{-j90^\circ}; \dot{U}_{mn} = \dot{I}_2 R_2; \dot{U}_{hl} = \dot{I}_3 R_3;$$

$$\dot{U}_{dk} = \dot{I}_1 R_1; \ \dot{U}_{nb} = \dot{I}_2 X_{L2} e^{j90^\circ}; \ \dot{U}_{ah} = \dot{I}_3 X_{C3} e^{-j90^\circ}.$$

$$\dot{U}_{kb} = \dot{I}_1 X_{L1} e^{j90^\circ};$$

Строим векторную диаграмму (рис. 3.9). Сперва откладываем токи, а затем строим напряжения.

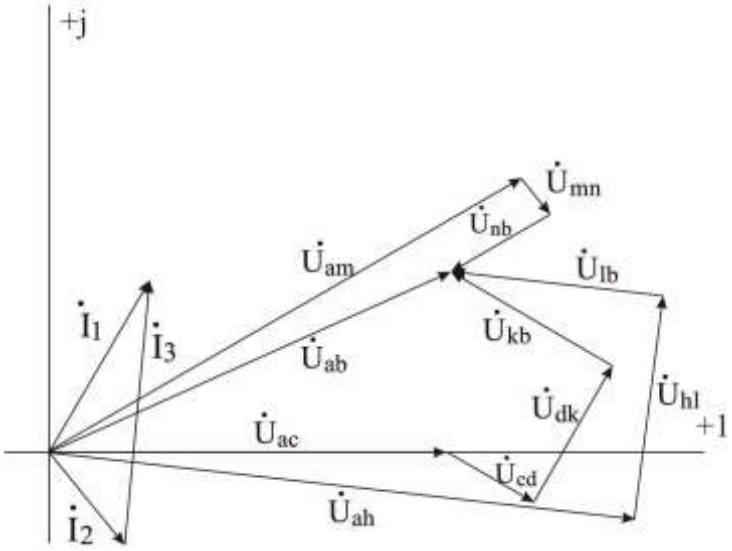


Рис.3.9. Векторная диаграмма для схемы на рис. 3.1.

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_{ac} + \dot{U}_{cd} + \dot{U}_{dk} + \dot{U}_{kb} = \dot{U}_{am} + \dot{U}_{mn} + \dot{U}_{nb} = \dot{U}_{ah} + \dot{U}_{hl} + \dot{U}_{lb}.$$

Алгоритм выполнения задания:

1. Определить токи во всех ветвях схемы и напряжения на каждом элементе цепи следующими методами:

а) методом проводимостей;

б) символическим методом эквивалентного преобразования схемы и узлового напряжения.

2. Составить баланс мощностей.

3. Построить векторную диаграмму токов и топографическую диаграмму напряжений.

Исходные данные приведены в табл. 3.1, схема – рис.3.10.

Частота тока f = 50 Гц.

Таблица 3.1

№ п/п	E_1, В	R_1, Ом	R_2, Ом	R_3, Ом	C_1, мкФ	C_2, мкФ	C_3, мкФ	L_1, мГн	L_2, мГн	L_3, МГн
0	100	1	3	5	396	354	796	12,75	38,2	12,75
1	120	2	4	6	265,25	1060	454,7	28,65	15,92	22,29
2	130	7	8	1	637	796	396	9,55	19,1	25,5
3	140	9	2	3	530	637	353,8	15,92	28,65	38,65
4	110	4	5	6	354	530	637	12,75	38,2	15,92
5	150	5	4	3	265	796	212,3	19,1	31,95	17,75
6	160	2	1	2	318	265	796	9,55	63,9	12,75
7	170	3	4	5	159	530	318,3	38,2	47,75	31,95
8	180	6	5	4	212	796	265	19,1	25,5	38,2
9	190	4	2	7	796	318	530	15,92	9,55	28,65
	1	2			3					

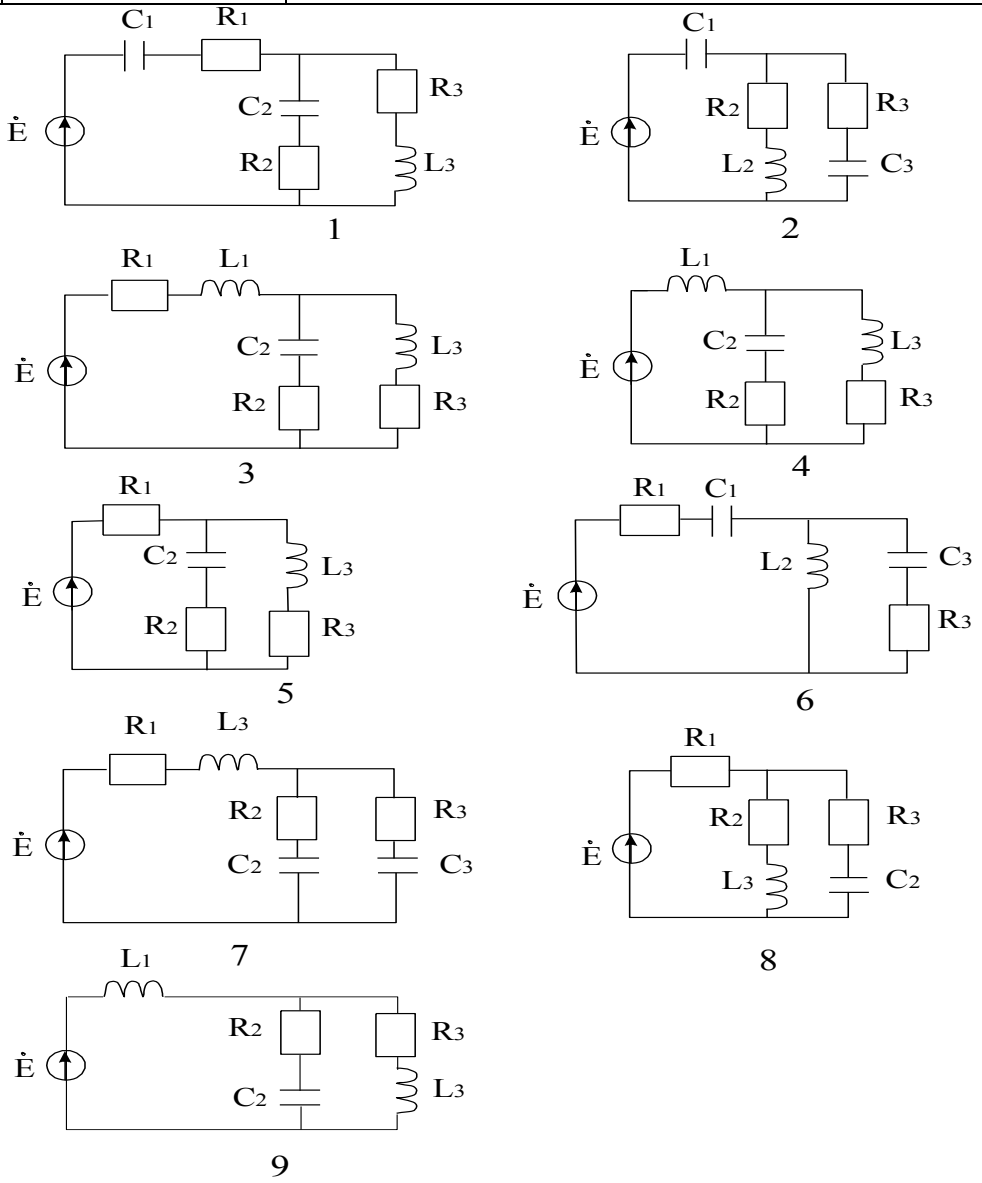


Рис. 3.10 Варианты схем

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://biblioonline.ru/book/elektrotehnika-i-elektronika-v-3-t-tom-1-elektricheskie-i-magnitnye-cepi-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.