

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 И ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

Методические указания к практическим занятиям
и самостоятельной работе для студентов специальности СПО
15.02.12 Монтаж, техническое обслуживание и ремонт промышленного
оборудования (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 и основы электроники: методические указания к практическим занятиям и самостоятельной работе [Электронный ресурс] для студентов специальности СПО 15.02.12 Монтаж, техническое обслуживание и ремонт промышленного оборудования (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 основы электроники» 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. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ, ПАРАЛЛЕЛЬНОМ И СМЕШАННОМ СОЕДИНЕНИИ 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
ЗАНЯТИЕ 4. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ И ВЫБОР ДВИГАТЕЛЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ. АППАРАТУРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ	27
ЗАНЯТИЕ №5. РАСЧЕТ СЕЧЕНИЙ ПРОВОДОВ И КАБЕЛЕЙ ПО ДОПУСТИМОЙ НАГРУЗКЕ И ПОТЕРЕ НАПРЯЖЕНИЙ	34
ЗАНЯТИЕ № 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНО- И ДВУХПОЛУПЕРИОДНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ. ГРАФИКИ ВЫПРЯМЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА	39
ЗАНЯТИЕ № 7. РАСЧЕТ СХЕМЫ ОДНО- И ДВУХПОЛУПЕРИОДНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ КОЭФФИЦИЕНТА СГЛАЖИВАНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТА ВЫПРЯМЛЕНИЯ СХЕМЫ, ПРИ РАЗЛИЧНЫХ КОНФИГУРАЦИЯХ СХЕМ ВЫПРЯМЛЕНИЯ	42
ЗАНЯТИЕ № 8. ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМЫ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ЭЛЕКТРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ	49
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	51

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Электротехника и основы электроники» состоит из лекционных 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 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. 1, а), может быть представлен в виде любой из двух эквивалентных схем: схемы из последовательного включения ЭДС и внутреннего (входного) сопротивления источника (рис. 1, б) и схемы из параллельно включенных источников тока и внутреннего (входного) сопротивления источника (рис. 1, в). Величина ЭДС E в схеме (рис. 1, б) численно равна напряжению на зажимах источника в режиме холостого хода (при отключенной нагрузке), а ток источника J_k в схеме (рис. 1, в) численно равен току короткого замыкания источника.

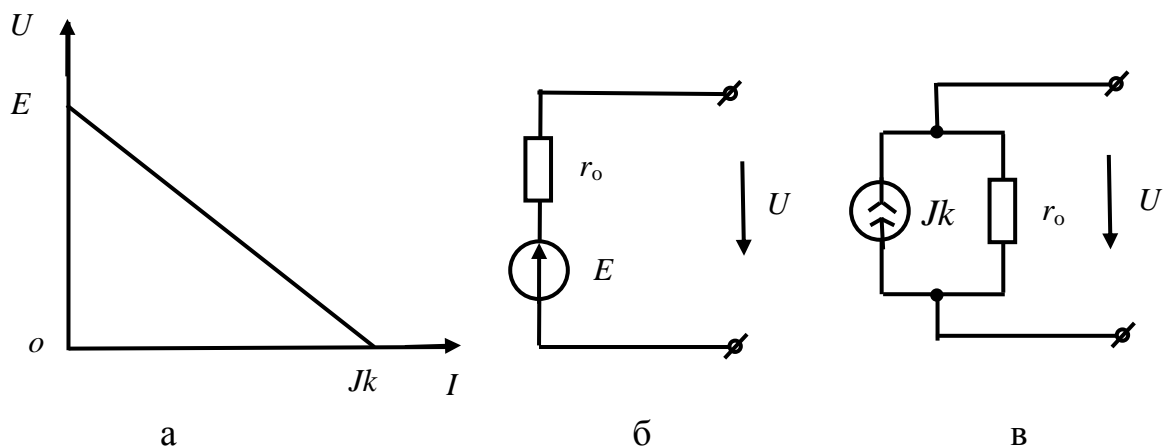


Рис. 1

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

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

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

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

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. 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.

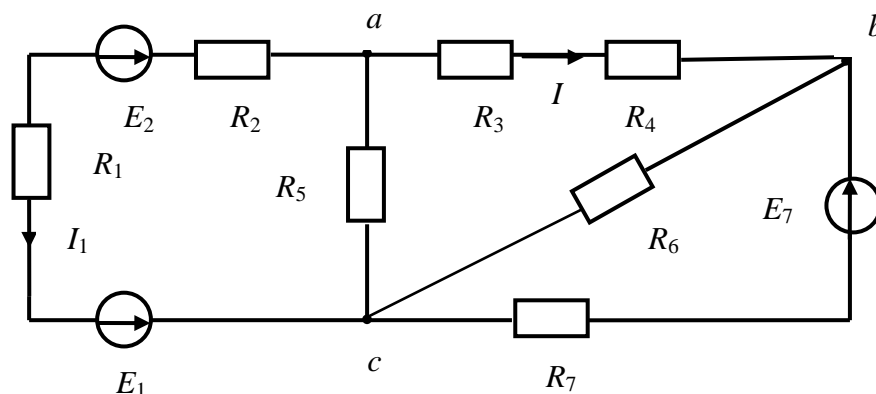


Рис. 2

Для ветви ac (рис. 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:

$$\sum IR = \sum E.$$

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. 3, а) в эквивалентную звезду и наоборот (рис. 3, б) производится по формулам

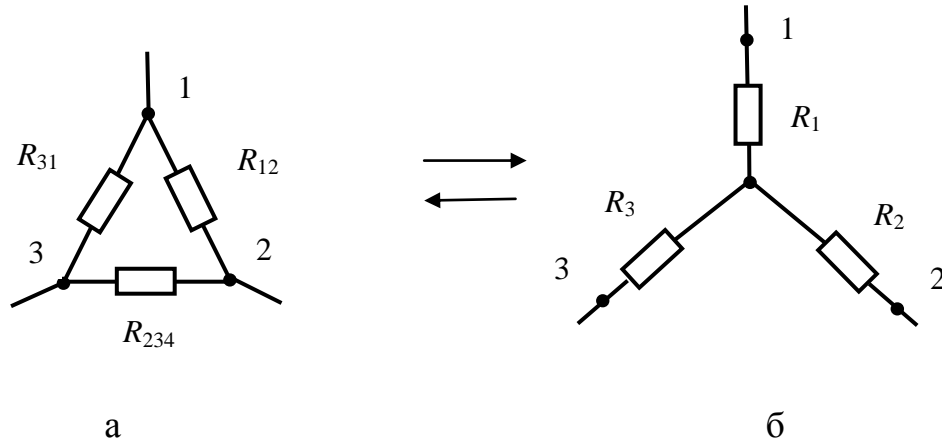


Рис. 3

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

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

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

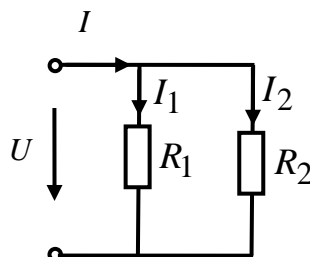


Рис. 4

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

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

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

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

Занятие 1. Расчет электрических цепей при последовательном, параллельном и смешанном соединении 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

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

При параллельном соединении конденсаторов эквивалентная емкость

$$C = C_1 + C_2 + C_3 \dots$$

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. 1.1 равна C . Определить эквивалентную емкость соединения.

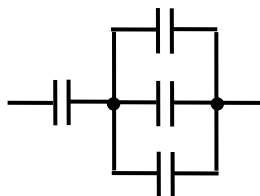


Рис. 1.1

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: научиться 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.

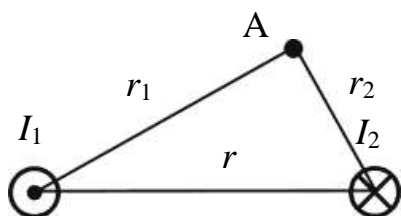


Рис. 2.1

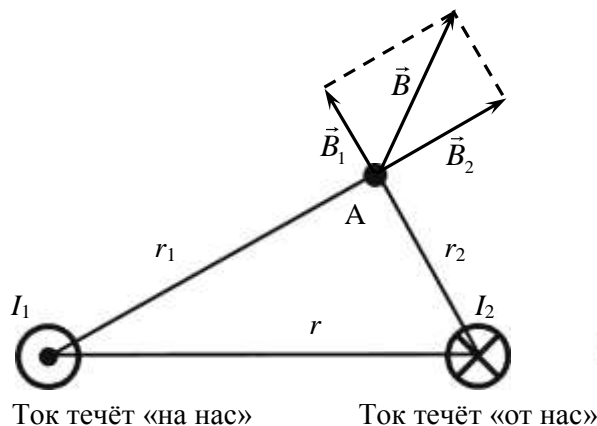


Рис. 2.2

Решение.

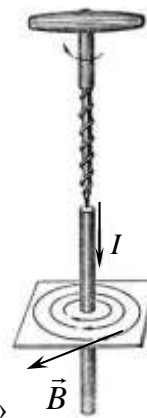
Магнитная индукция в точке А складывается из магнитных индукций токов I_1 и I_2 в этой точке:

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

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 магнит-



ных 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: $B = 83,3 \text{ мкТл}$.

Задача 2.2.

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

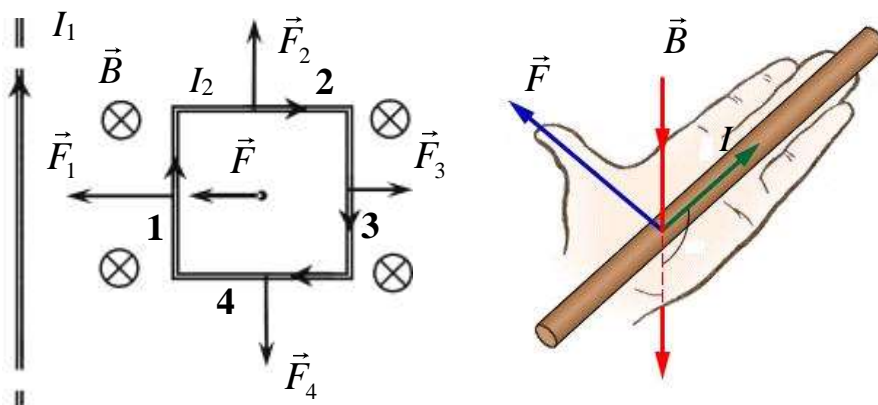


Рис. 2.3

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 90° 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 α к направлению тока, то него действует сила Ампера, равная по модулю:

$$F_A = I \cdot B \cdot l \cdot \sin \alpha.$$

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: $F = 3,41 \cdot 10^{-7} \text{ Н}$.

Задача 2.3.

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

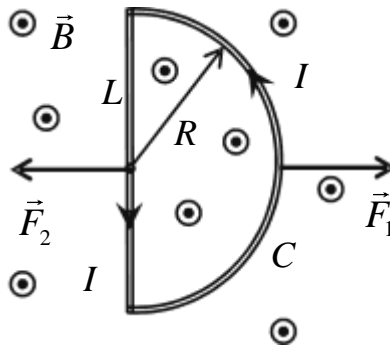


Рис. 2.4

Решение.

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

$$d\vec{F}_A = I \cdot [d\vec{l}, \vec{B}].$$

Равнодействующая всех сил может быть определена путём интегрирования:

$$\vec{F}_1 = \int_C d\vec{F}_A.$$

Однако, учитывая, что провод находится в однородном 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,

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

Применяя закон Ампера для прямолинейного проводника L , получаем

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

Задача 2.4.

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

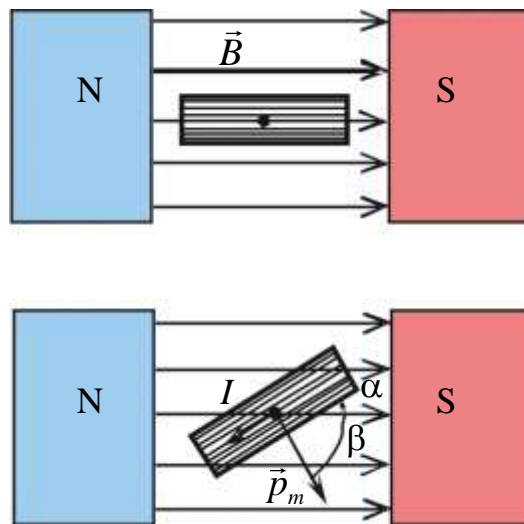


Рис. 2.5

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 уравнивается моментом сил упругости $M_{\text{упр}}$, возникающим в нити при закручивании на угол β , 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: $\beta = 90^\circ - \alpha = 60^\circ$. Момент силы упругости пропорционален углу закручивания нити:

$$M_{\text{упр}} = C \cdot \alpha,$$

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

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

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

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

Задача 2.5.

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

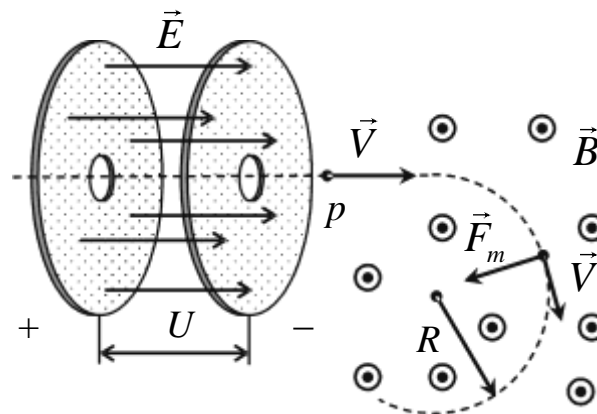


Рис. 2.6

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 90° большой палец левой руки показывает направление силы Лоренца, действующей на положительный заряд. Если заряд отрицательный, то направление действия силы Лоренца изменяем на противоположное. Магнитная составляющая силы Лоренца определяется по формуле:

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

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

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

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 $\Delta\phi$, возникающую между концами крыльев самолёта, если вертикальная составляющая индукции земного магнитного поля равна $B = 3 \times 10^{-5}$ Тл, а размах крыльев самолёта $L = 12,5$ м.

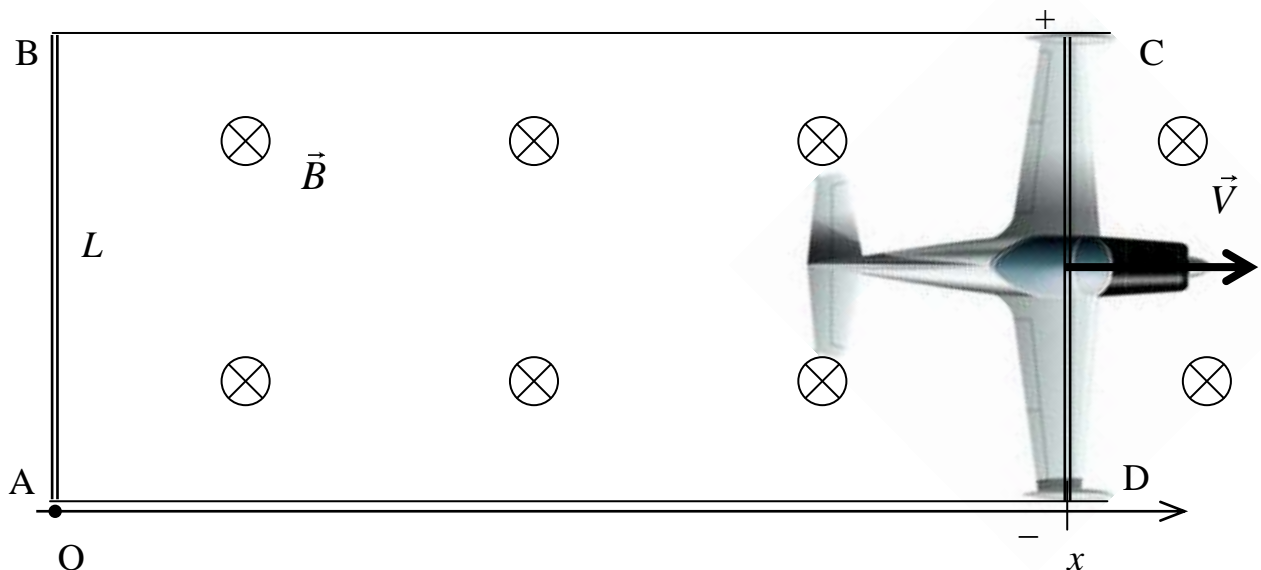


Рис. 2.7

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: $\Phi(t) = BLx$. 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: $\Delta\varphi = 0,1 \text{ В.}$

Задача 2.7.

Проволочное кольцо радиусом $r = 10 \text{ см}$ 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 $\Phi_1 = B\pi r^2$. 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:

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

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

Ответ: $Q = 3,14 \text{ мкКл.}$

Задача 2.8.

На рамку площадью $S = 200 \text{ см}^2$ намотано $N = 100$ витков провода. Она равномерно вращается с частотой $n = 10 \text{ об/с}$ относительно оси, лежащей в плоскости рамки и перпендикулярно линиям индукции магнитного поля ($B = 0,2 \text{ Тл}$). Найти максимальную ЭДС индукции, возникающую в

проводе. Определить максимальный индукционный ток, если сопротивление провода $R = 5 \text{ Ом}$.

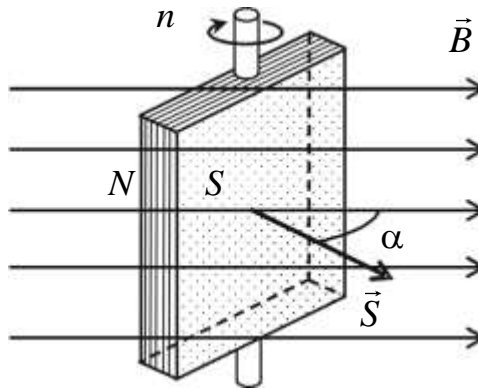


Рис. 2.8

Решение.

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

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

Поэтому в рамке возникает ЭДС индукции:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt} = 2\pi n BSN \sin(2\pi n t).$$

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

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

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

Задача 2.10.

Прямоугольная проволочная рамка расположена в одной плоскости с длинным прямым проводом (рис. 2.3) так, что её большая сторона $a = 2 \text{ см}$ параллельна проводу. Другая сторона рамки в 2 раза меньше. По рамке и проводу текут одинаковые токи силой $I_1 = I_2 = 1 \text{ кА}$. 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 $S = 30 \text{ см}^2$, 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 $\alpha = 30^\circ$ 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 $\omega = 5$ 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 $S = 100 \text{ см}^2$.

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 произвольной 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:

$$X_L = \omega L = 2\pi f 10^{-3} = 314 L \cdot 10^{-3} \text{ Ом},$$

$$X_C = 1/\omega C = 1/(2\pi C 10^{-6}) = 10^6/(314 C) \text{ Ом},$$

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).

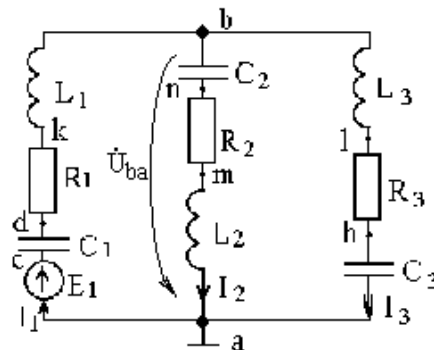


Рис. 3.1. Схема однофазной цепи переменного тока

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

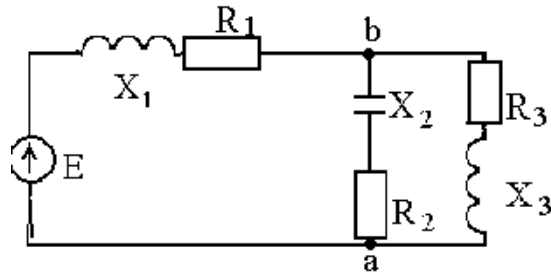


Рис. 3.2. Схема замещения

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

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

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

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

Параллельная ветвь 3 (X_3 – индуктивный характер):

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

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

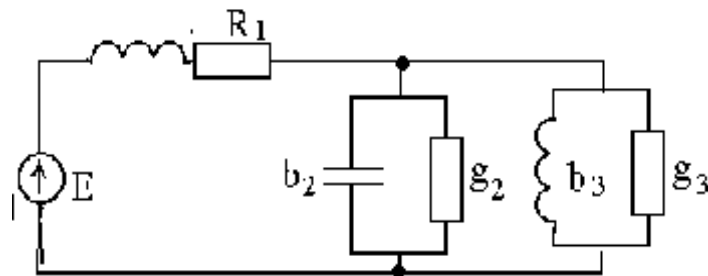


Рис. 3.3. Схема замещения после преобразования параллельных ветвей

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

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

Определяем эквивалентные проводимости двух ветвей (рис. 3.4):

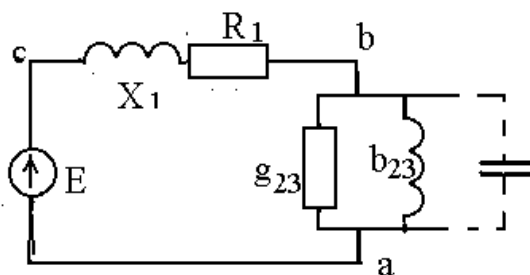


Рис. 3.4

$$g_{23} = g_2 + g_3,$$

$$b_{23} = b_3 - b_2,$$

$$Y_{23} = \sqrt{g_{23}^2 + b_{23}^2} = Y_{ab}$$

Характер проводимости b_{23} определяется по знаку b_{23} : при (+) характер индуктивный, при (–) – емкостный. Схема имеет вид, показанный на рис. 3.4.

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

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

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

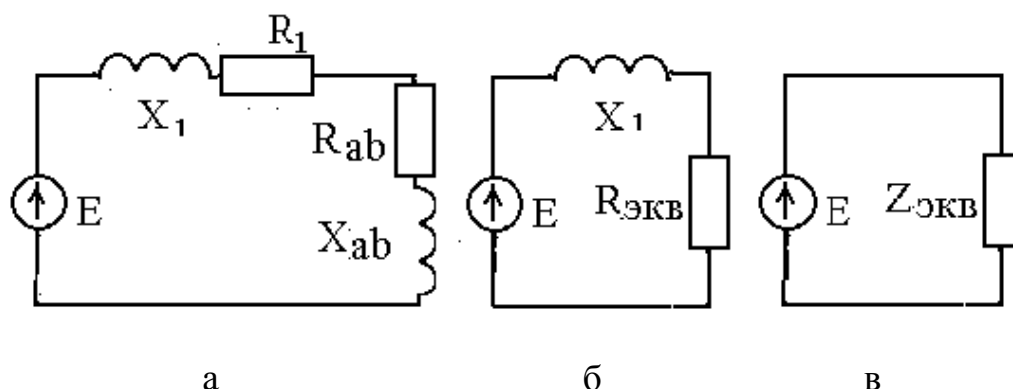


Рис. 3.5. Схемы замещения при переходе к сопротивлениям.

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

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

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

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

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

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

$$U_{ab,a} = I_1 R_{ab}; \quad U_{ab,p} = I_1 X_{ab}; \quad U_{ab} = \sqrt{U_{ab,a}^2 + U_{ab,p}^2}.$$

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

$$I_2 = Y_2 U_{ab}; \quad I_{2a} = g_2 U_{ab}; \quad I_{2p} = b_2 U_{ab}; \quad I_2 = \sqrt{I_{2a}^2 + I_{2p}^2};$$

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

$$I_3 = Y_3 U_{ab}; \quad I_{3a} = g_3 U_{ab}; \quad I_{3p} = b_3 U_{ab}; \quad I_3 = \sqrt{I_{3a}^2 + I_{3p}^2};$$

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

Проверка по первому закону Кирхгофа:

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

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

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

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

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):

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

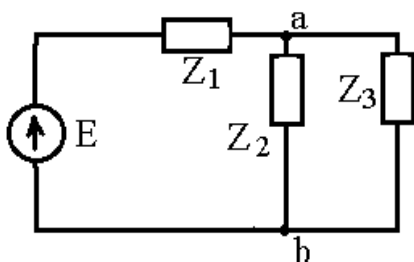


Рис. 3.6

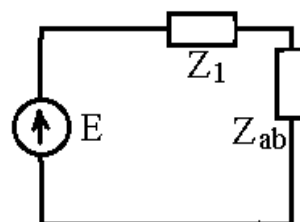


Рис. 3.7

Определяем комплексные токи в ветвях:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}}{Z_{\text{экв}}} = I_1 e^{\pm j\varphi} = I_{1a} \pm jI_{1p};$$

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_1 Z_3 / (Z_2 + Z_3) = I_2 e^{\pm j\varphi} = I_{2a} \pm jI_{2p};$$

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_1 Z_2 / (Z_2 + Z_3) = I_3 e^{\pm j\varphi} = I_{3a} \pm jI_{3p}.$$

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 $\dot{U}_{ab} = \dot{I}_1 Z_{ab}$, $\dot{U}_{ab} = \dot{I}_2 Z_2$ или $\dot{U}_{ab} = \dot{I}_3 Z_3$. 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).

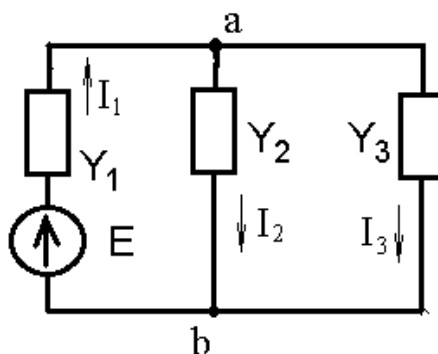


Рис. 2.8. Схема замещения с комплексными проводимостями ветвей

$$\underline{Y}_1 = \frac{1}{Z_1 e^{\pm j\varphi_1}} = Y_1 e^{\pm j\varphi_1} = \pm g_1 \pm jb_1,$$

$$\underline{Y}_2 = \frac{1}{Z_2 e^{\pm j\varphi_2}} = Y_2 e^{\pm j\varphi_2} = \pm g_2 \pm jb_2,$$

$$\underline{Y}_3 = \frac{1}{Z_3 e^{\pm j\varphi_3}} = Y_3 e^{\pm j\varphi_3} = \pm g_3 \pm jb_3.$$

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 равенство $\tilde{S}_{\text{ист}} = \tilde{S}_{\text{пр}}$.

Мощность источников рассчитывается как:

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

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

Мощность приемников равна:

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

где I_1, I_2, I_3 – модули комплексных токов.

Активные и реактивные мощности источников и приемников также равны между собой:

$$P_{\text{ист}} = P_{\text{пр}}; \quad Q_{\text{ист}} = Q_{\text{пр}}.$$

Погрешность вычислений не должна превышать 2 %.

Построение векторной диаграммы

Находим напряжение на каждом элементе схемы и строим векторную диаграмму (для схемы на рис. 2.1), представляющую собой графическое изображение первого и второго законов Кирхгофа на комплексной плоскости.

Комплексные напряжения на участках цепи по закону Ома:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ac} &= \dot{E}_1; \dot{U}_{nb} = \dot{I}_2 X_{C2} e^{-j90^\circ}; \dot{U}_{lb} = \dot{I}_3 X_{L3} e^{j90^\circ}; \\ \dot{U}_{cd} &= \dot{I}_1 X_{C1} e^{-j90^\circ}; \dot{U}_{mn} = \dot{I}_2 R_2; \dot{U}_{hl} = \dot{I}_3 R_3; \\ \dot{U}_{dk} &= \dot{I}_1 R_1; \dot{U}_{nb} = \dot{I}_2 X_{L2} e^{j90^\circ}; \dot{U}_{ah} = \dot{I}_3 X_{C3} e^{-j90^\circ}. \\ \dot{U}_{kb} &= \dot{I}_1 X_{L1} e^{j90^\circ}; \end{aligned}$$

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

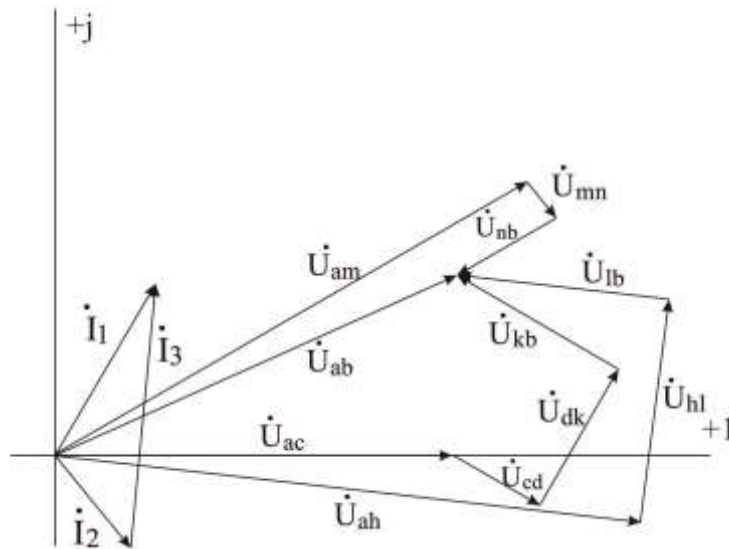


Рис. 3.9. Векторная диаграмма для схемы на рис. 3.1.

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

Задание для самостоятельного решения

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.

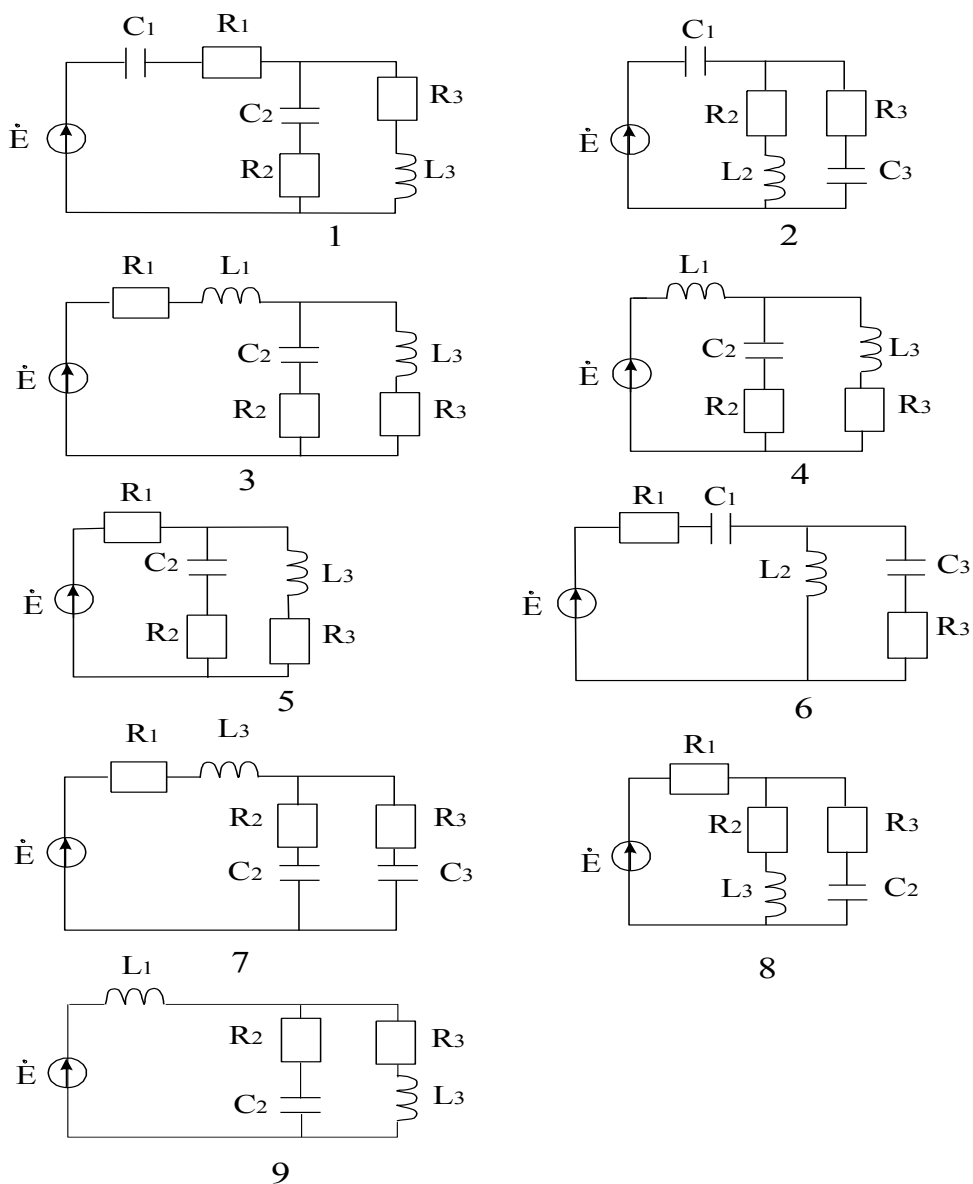
Исходные данные приведены в табл. 3.1, схема – рис.3.10.

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

№ 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
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					



9

Рис. 3.10 Варианты схем

Занятие 4. Расчет мощности и выбор двигателя при различных режимах работы. Аппаратура для управления электроприводом

Цель занятия: Анализ видов механического воздействия на движение ротора электродвигателя со стороны элементов механической передачи и исполнительного органа рабочей машины.

Теоретические сведения

В практической деятельности инженеру-электрику очень часто приходится сталкиваться с задачей послеаварийного восстановления электро-механических систем производственных механизмов при отсутствии на них технической документации, либо с задачей проектирования вновь создаваемых электро-механических систем. Выбор электродвигателя – важнейший этап при решении подобных задач. Рационально выбранный двигатель в значительной степени определяет надежность, долговечность и экономическую эффективность работы всей проектируемой (или ремонтируемой) технологической установки.

Необходимыми предварительными условиями для выбора электрического двигателя в заданных условиях применения являются:

1) знание требуемых технологических характеристик механического движения, а именно:

- требуемой скорости вращения вала;
- требуемой механической мощности на валу;
- значения максимального механического момента сопротивления вращению;
- значения пускового момента;
- временной диаграммы изменения нагрузки;

2) знание конструктивных требований к двигателю определяемых условиями его применения:

- степени защиты от внешних воздействий;
- рабочего положения двигателя в пространстве;
- способа крепления двигателя к фундаменту;
- высоты оси вращения вала ротора относительно плоскости крепления.

Рассмотрим первый этап алгоритма выбора электрического двигателя более подробно.

Механической характеристикой двигателя называется зависимость его скорости от развиваемого момента $\omega(M)$ (двигатель вращательного движения) или усилия $v(F)$ (двигатель поступательного движения). Различают естественную и искусственную характеристики двигателей.

Естественная характеристика двигателя (она у него единственная) соответствует основной (паспортной) схеме его включения и номинальным параметрам питающего напряжения. На естественной характеристике располагается точка номинального (паспортного) режима двигателя с координатами ω_n, M_n .

Механической характеристикой исполнительного органа рабочей машины или производственного механизма называется зависимость скорости от возникающего при его движении усилия или момента, т.е. $\omega_{ио}(M_{ио})$ при вращательном движении исполнительного органа и $v_{ио}(F_{ио})$ при его поступательном движении. В результате выполнения операции приведения к валу двигателя эти характеристики преобразуются в зависимость вида $\omega(M_c)$, где ω – скорость двигателя, а M_c – приведенный к его валу момент нагрузки (сопротивления).

Статические силы и моменты механизмов

Статические силы и моменты, возникающие в механизмах при их работе, делят на реактивные – препятствующие совершению работы внешними силами и на активные – силы способные совершить механическую работу.

Реактивные силы и моменты создаются силами трения, а также силами сжатия, растяжения, кручения неупругих тел. Как правило, они препятствуют движению, скачком изменяют направление своего действия при изменении знака скорости движения рабочего органа (рис. 4.1, а).

Активные (потенциальные) силы и моменты, создаваемые силой тяжести, силами сжатия, растяжения, кручения упругих тел, сохраняют направление действия при изменении направления скорости движения и, следовательно, либо препятствуют движению механизма, либо способствуют ему. Так, например, момент, создаваемый грузом в подъемном механизме, сохраняет знак и при подъеме груза, и при его опускании (рис. 4.1, б).

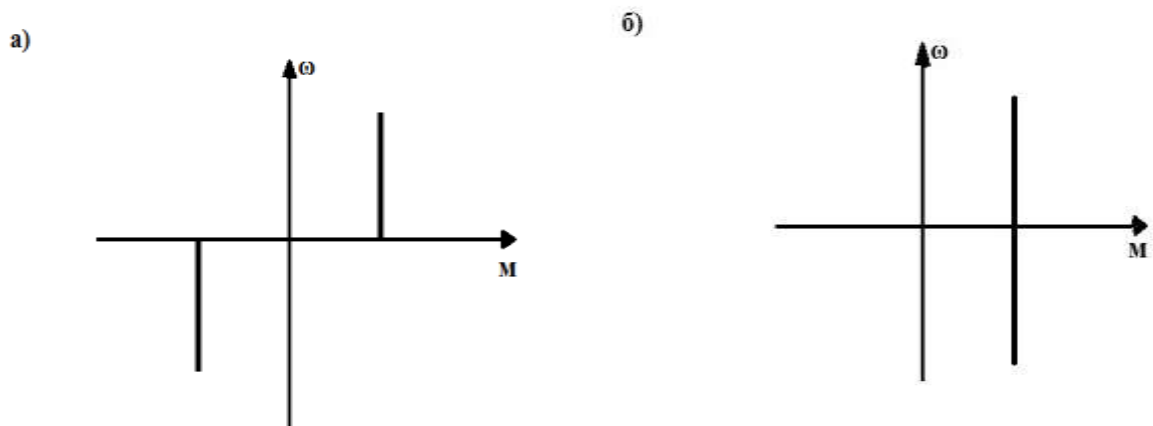


Рис. 4.1. График реактивного статического момента (а) и активного моментов (б)

Значение и характер статического момента определяются типом и свойствами рабочей машины (технологического процесса). Для расчета (выбора) электрического двигателя важна зависимость статического момента сопротивления вращению на валу от скорости вращения вала двигателя (механическая характеристика рабочей машины). В общем случае зависимость момента сопротивления движению, создаваемого рабочей машиной на валу электрического двигателя, от скорости (при неизменном направлении движения) можно выразить функцией вида:

$$M_c(\omega) = M_{c.0} + (M_{c.n} - M_{c.0}) \left[\frac{\omega}{\omega_n} \right]^\beta,$$

где $M_{c.0}$ – момент механических потерь на трение при $\omega = 0$; $M_{c.n}$ – статический момент рабочей машины при номинальной скорости машины; ω – текущая угловая скорость вала машины; ω_n – номинальная скорость вала машины; β – показатель степени.

В большинстве практических случаев показатель степени $\beta = 0$ ($M_{\text{мех}} = \text{const}$), при этом нагрузка зависит только от направления скорости вращения двигателя. Примером постоянной нагрузки может служить сила тяжести поднимаемого груза (рис. 4.1, б) и сила, обусловленная сухим трением, при неизменном направлении движения.

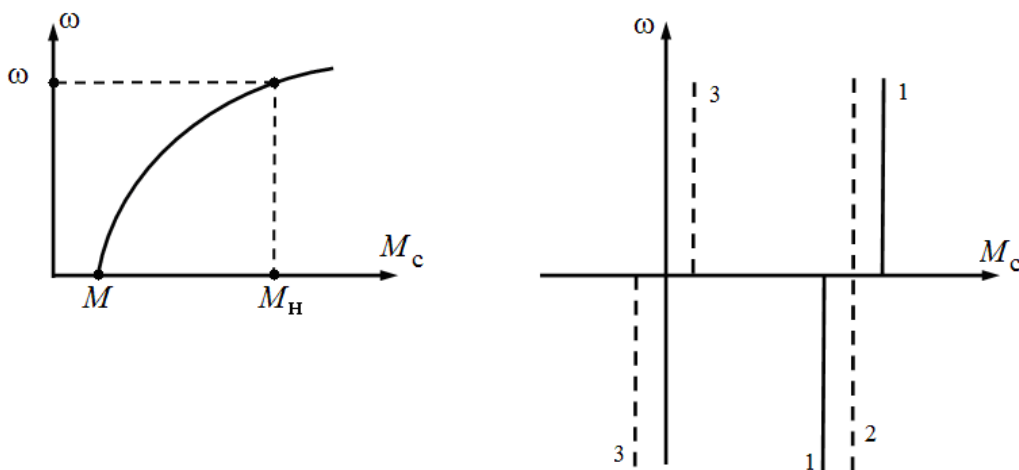


Рис. 4.2. Виды зависимости статического момента и скорости вращения вала: а) момент, создаваемый силами вязкого трения; б) момент создаваемый силами сухого трения: 1 – зависимость активного момента от скорости вращения подъемной лебедки с учетом ее КПД; 2 – зависимость активного момента от скорости подъемной лебедки без учета ее КПД; 3 – реактивный момент, созданный силами сухого трения (например, силами сопротивления при резании металла, дерева)

При $\beta > 0$ нагрузка зависит от скорости. Такой характеристикой обладают силы и моменты вязкого трения. Например, при $\beta = 1$, такую зависимость момента сопротивления от скорости вращения вала имеет генератор постоянного тока, работающий с постоянным потоком возбуждения и с неизменным сопротивлением нагрузки в цепи якоря.

Механическую характеристику механизма, получающуюся при $\beta > 1$ называют вентиляторной. Такой зависимостью момента сопротивления от скорости обладают центробежные вентиляторы и насосы, работающие на противодавление.

На рис. 4.2 представлены наиболее распространенные виды этих характеристик.

В некоторых механизмах статический момент зависит от угла поворота вала двигателя (кривошипные механизмы, манипуляторы роботов, а также похожие нагрузки создают кинематические погрешности передач). Как правило, характер этих зависимостей синусно-косинусный.

Приведение статических моментов и моментов инерции к валу электродвигателя

Одна из тенденций развития современных электромеханических систем – переход к непосредственному сочленению электродвигателя с рабочим органом машины без промежуточных механических передач. Однако значительная доля производственных машин работает с частотой вращения рабочего органа около 100÷200 об/мин.

Напротив, электродвигатели, в целях минимизации их габаритов и массы, целесообразно конструировать на повышенную частоту вращения ротора 1000÷3000 об/мин. Поэтому, для сочленения двигателя и рабочей машины в большинстве случаев необходим редуктор с передаточным отношением j от нескольких десятков до сотен. При изучении динамических и статических нагрузок двигателя в такой системе следовало бы составлять уравнения движения для каждой из осей вращения: для оси двигателя, механизма и каждой из промежуточных осей передачи. Однако в целях упрощения реальную систему заменяют некоторой приведенной (эквивалентной) системой, вращающейся со скоростью двигателя (или, в некоторых случаях, со скоростью рабочего органа машины). Поскольку наша задача – выбор электрического двигателя, мы выбираем в качестве оси приведения ось вращения двигателя.

Для получения приведенной системы все моменты – движущие и статические, все массы и моменты инерции, жесткости в кинематической цепи должны быть пересчитаны относительно оси приведения таким образом, чтобы сохранить динамические и энергетические свойства исходной системы.

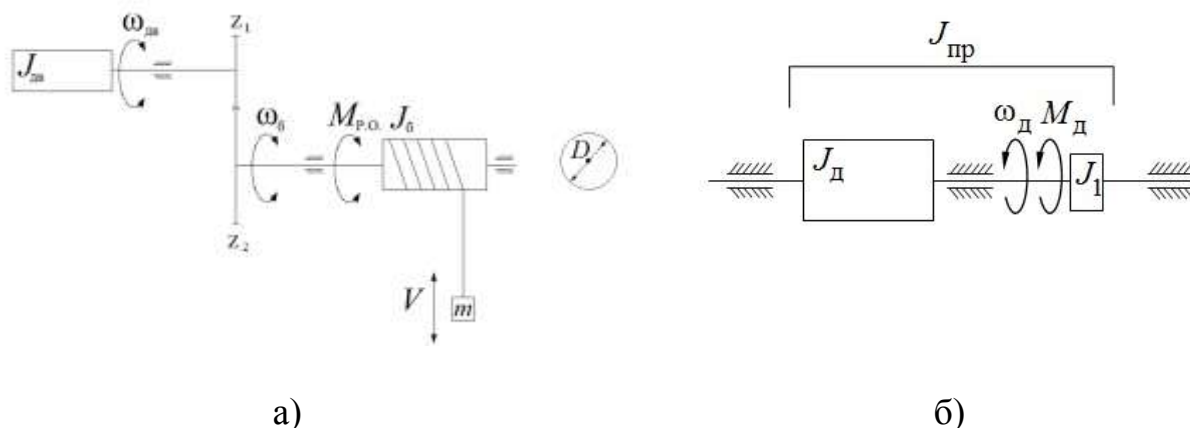


Рис. 4.3. Исходная (а) и приведенная (б) электромеханическая система «двигатель – редуктор – механизм»

При приведении моментов и сил к оси вращения двигателя исходят из условия сохранения мощности. Без учета потерь в передаче получим:

$$M_{с.пр}\omega_д = M_{см}\omega_м,$$

где $M_{с.пр}$ – статический момент механизма, приведенный к валу двигателя; $M_{см}$ – момент сопротивления на валу механизма; $\omega_д$ и $\omega_м$ – угловые скорости двигателя и механизма.

Отсюда

$$M_{с.пр} = \frac{M_{см}\omega_м}{\omega_д} = \frac{M_{см}}{j}.$$

В этом выражении $j = \omega_д/\omega_м$ – передаточное отношение редуктора.

Тогда статический момент механизма, приведенный к валу двигателя с учетом потерь в редукторе составит:

$$M_{с.пр} = \frac{M_{см}}{j\eta_p},$$

где η_p – КПД редуктора.

Аналогично для силы приложенной к поступательно движущемуся элементу

$$M_{с.прi} = F\rho,$$

где $\rho = \frac{v}{\omega_д}$ – радиус приведения.

Если нагрузка двигателя создается активным моментом (например, грузом, поднимаемым лебедкой (рис. 4.3)), то при учете влияния КПД на статический момент необходимо учитывать направление движения груза. При подъеме энергия передается от двигателя поднимающемуся грузу и потери на трение в редукторе увеличивают момент, приведенный к валу двигателя. При спуске направление потока энергии через кинематическую цепь меняется на противоположное. В этом случае силы трения в механиз-

ме уменьшают момент, приведенный к валу двигателя (в данном случае тормозной момент), помогая ему тормозить опускающийся груз. Поэтому у механизмов с активным моментом нагрузки приведенный к валу двигателя статический момент $M_{с.пр}$ при изменении направления движения изменяется скачком на значение, равное удвоенному моменту трения в механизме

$$M_{с.пр} = M_{см}\eta_p/j.$$

Приведение масс и моментов инерции рабочих механизмов к валу электрической машины

Для правильной оценки величины тепловых потерь в электрической машине при работе ее в переходных режимах (пуск, реверс, торможение) необходимо знать приведенные к валу электрического двигателя все массы и моменты инерции движущихся частей рабочей машины.

Приведенный момент инерции движущихся масс рабочей машины определяется из условия равенства кинетической энергии в реальной (рис. 4.3, а) и в приведенной системе (рис. 4.3, б).

Кинетическая энергия приведенной системы:

$$W_{пр} = J_{пр}\omega_d^2/2$$

и кинетическая энергия исходной системы:

$$W_{исх} = \frac{J_d\omega_d^2}{2} + \frac{J_6\omega_6^2}{2} + \frac{mv^2}{2} = \frac{J_{пр}\omega_d^2}{2}$$

должны быть равны:

$$W_{пр} = W_{исх}.$$

Приравняв кинетическую энергию электромеханической системы до приведения и после приведения и разделив равенства на $\omega_d^2/2$, получим приведенный момент инерции:

$$J_{пр} = J_d + \frac{J_6\omega_6^2}{\omega_d^2} + \frac{mv^2}{\omega_d^2} = J_d + \frac{J_6}{j^2} + m\rho^2,$$

где $j = \omega_d/\omega_6$ – передаточное отношение редуктора; $\rho = \frac{v}{\omega_d}$ – радиус приве-

дения для линейно движущихся масс; J_d – момент инерции двигателя; J_6 – момент инерции барабана подъемного механизма; m – масса линейно движущегося груза; v – линейная скорость груза с массой m .

Для оценки влияния инерционности рабочей машины на переходные процессы в показатели стандартных режимов работы двигателя вводится понятие коэффициента инерции FI :

$$FI = \frac{J_d + \frac{J_6}{j^2} + mr^2}{J_d}.$$

Коэффициент инерции FI – это отношение приведенного к валу двигателя момента инерции всей электромеханической системы к моменту инерции ротора самой электрической машины.

Задание

Приведите к валу двигателя силы и моменты, массы и моменты инерции для подъемного механизма, схема которого показана на рис. 4.3. Численные значения параметров даны в табл. 4.1. Моментом инерции редуктора пренебречь, КПД механических передач считать равным 0,97 на ступень.

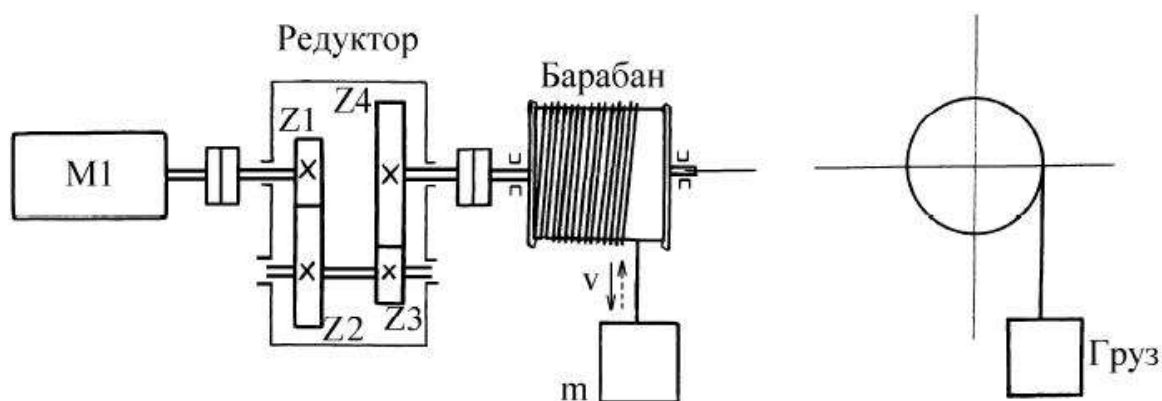


Рис. 4.3. Кинематическая схема подъемного механизма

Табл. 4.1

№ варианта	Момент инерции, кг·м ²		Масса груза m , кг	Число зубьев шестерен редуктора				Диаметр барабана, м
	ротора двигателя M_1	барабана		Z1	Z2	Z3	Z4	
0	1,0	20	70	19	32	15	40	0,9
1	1,2	25	80	15	35	18	42	1,0
2	1,4	28	95	17	32	20	40	1,2
3	2,2	34	119	16	40	26	66	1,4
4	2,6	40	125	20	33	21	33	1,6
5	5,2	43	140	18	38	15	50	1,8
6	6,4	49	155	20	39	16	35	2,0
7	10,0	55	180	14	36	17	44	2,1
8	15,0	61	205	22	46	18	40	2,2
9	16,0	66	250	23	77	22	46	2,3

№ варианта	Момент инерции, кг·м ²		Масса груза m , кг	Число зубьев шестерен редуктора				Диаметр барабана, м
	ротора двигателя M_1	барабана		Z1	Z2	Z3	Z4	
10	21,0	90	300	19	32	16	48	2,4
11	22,0	100	340	13	31	22	34	2,5
12	23,0	105	350	14	42	14	56	2,6
13	24,5	110	380	21	43	16	57	1,1
14	25,0	120	400	24	44	22	50	1,3
15	30,0	130	420	25	41	23	47	1,5
16	7,0	50	185	15	42	24	45	1,7
17	8,0	52	190	16	37	28	51	1,5
18	9,0	53	200	17	35	30	60	1,8

Контрольные вопросы

1. Каково назначение механической части силового канала в системах электропривода?
2. С какой целью все массы и силы механической системы приводят к одной скорости?
3. Выведите уравнение приведения моментов инерции к одной скорости.
4. Приведите примеры реактивных моментов.
5. Как выглядят естественные механические характеристики различных типов электродвигателей?
6. Что такое жесткость механической характеристики?
7. Как на механической характеристике определить точку статического равновесия?
8. Какими должны быть соотношения между статическим моментом и моментом двигателя для получения ускоренного, замедленного и равномерного движения?
9. Как зависит время разбега и замедления от величины момента инерции?

Занятие №5. Расчет сечений проводов и кабелей по допустимой нагрузке и потере напряжений

Цель занятия: научиться выбирать сечение кабеля для линий электропередач по допустимому току и потере напряжения.

Теоретические сведения

Прохождение электрического тока вызывает нагрев проводов. При некоторой температуре провода, называемой установившейся, наступает равновесие между теплом, выделяемым током и теплом, отдаваемым в

окружающую среду. Нагрев проводов допускается до определенных температур (65...80 °С), определяемых свойствами изоляции или свойствами самих проводов. Ток, при котором достигается установившаяся наибольшая допустимая температура, называется допустимым током провода I_d . При определении сечения проводов пользуются понятиями:

номинальная мощность P_n – указанная на электроприемнике;

установленная мощность P_y – сумма номинальных мощностей всех установленных приемников;

расчетная мощность P_p – мощность, по которой производится расчет.

Указанным мощностям соответствуют токи I_n , I_y , I_p , которым присваиваются те же отличительные названия.

Все приемники энергии практически одновременно не включаются, двигатели постоянно полностью не загружены, поэтому при расчетах исходят не из установленной мощности, а из той части ее P_p , которая может одновременно использоваться потребителем.

Отношение расчетной мощности к установленной называют – КОЭФФИЦИЕНТОМ СПРОСА:

$$K_c = \frac{P_p}{P_y} \text{ или } K_c = \frac{I_p}{I_y}$$

Коэффициент спроса принимают при осветительной нагрузке:

для сетей наружного освещения $K_c = 1$;

для сетей бытового освещения $K_c = 0,7...0,8$;

для сетей промышленных предприятий $K_c = 0,7...0,9$.

При осветительной нагрузке расчетный ток для цепей однофазного переменного тока и для постоянного тока

$$I_p = \frac{P_p}{U} = \frac{K_c \cdot P_y}{U},$$

для трехфазных цепей

$$I_p = \frac{P_p}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{K_c \cdot P_y}{\sqrt{3} \cdot U}$$

При силовой нагрузке для цехов холодной обработки металлов коэффициент спроса принимают:

при одном – двух установленных двигателях $K_c = 1$;

при четырех $K_c = 0,8$;

при шести $K_c = 0,6$.

Номинальный ток двигателей:

постоянного тока

$$I_n = \frac{P_n}{U \cdot \eta}$$

трехфазного

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \eta \cdot \cos \varphi},$$

где η – КПД электродвигателя.

Значения P_n , η , $\cos \varphi$ для двигателей берутся из справочников или каталогов.

При ориентировочных расчетах для двигателей небольшой мощности до 10...12 кВт произведение η и $\cos \varphi$ можно считать равным 0,7...0,8.

Расчетный ток двигателей:

$$I_p = K_c \cdot I_n = K_c \cdot I_y$$

Определение сечения проводов по допустимому нагреву производится по каталогу, в котором для стандартных сечений проводов приведены предельно длительные допустимые токи I_d , при этом учитывается категория помещения, условия окружающей среды, вид и способа прокладки.

Допустимый ток провода должен быть не меньше расчетного.

$$I_d \geq I_p$$

Таким образом, выбирается провод такого сечения, допустимый ток которого равен расчетному или несколько больше его.

Выбранное сечение проводов необходимо проверить по потере напряжения. Как известно, потерей напряжения называется арифметическая разность напряжений в начале и конце линии: $\Delta U = U_1 - U_2 = I \cdot R_{np}$, то есть равна падению напряжения в проводах линии:

$$\Delta U = I \cdot R_{np} = I \cdot \frac{2 \cdot l}{\gamma \cdot S}$$

где l – длина линии, м;

S – сечение провода, мм²;

$\gamma = \frac{1}{\rho}$ – удельная проводимость, $\frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$.

По заданной допустимой потере напряжения, используя формулу (1), можно определить сечение проводов двухпроводной линии постоянного тока:

$$S = \frac{I \cdot 2 \cdot l}{\gamma \cdot \Delta U}$$

Часто потерю напряжения выражают в процентах в начале линии, называя ее относительной потерей напряжения.

$$\varepsilon = \frac{\Delta U}{U} \cdot 100\% \quad \Delta U = \frac{\varepsilon \cdot U}{100\%}, \text{ откуда}$$

Допустимая относительная потеря напряжения для осветительной нагрузки составляет 2...3 %, а для силовой 4...6 %.

Заменим в формуле значение ΔU относительной потерей напряжения ε и получим формулу:

$$S = \frac{2 \cdot 100 \cdot I \cdot l}{\gamma \cdot \varepsilon \cdot U}$$

или, умножив и разделив на U , получим эту формулу в другом виде:

$$S = \frac{2 \cdot 100 \cdot P \cdot l}{\gamma \cdot \varepsilon \cdot U^2}$$

Из этой формулы следует, что относительная потеря напряжения

$$\varepsilon = \frac{2 \cdot 100 \cdot P \cdot l}{\gamma \cdot S \cdot U^2}$$

По этим формулам можно определить сечение проводов линии по заданной относительной потере напряжения или соответственно определяют относительную потерю напряжения ε в линиях по заданному сечению проводов.

Задача 5.1.

Определить расчетный ток в магистральных проводах трехфазной линии с линейным напряжением $U_{\text{л}} = 220$ В, если к ней присоединены три электродвигателя с номинальной мощностью $P_{\text{н1}} = 4,5$ кВт, $P_{\text{н2}} = 2,8$ кВт, $P_{\text{н3}} = 3,5$ кВт. Длина линии $l = 15$ м.

Выбрать сечение алюминиевых проводов S , проложенных открыто, исходя из условия допустимого нагревания их. Выбранное сечение проверить по допустимой относительной потере напряжения, которая не должна превышать для силовой нагрузки 4...6%. Кратность пускового тока электродвигателей принимаем равной $K_i = 7$, произведение $\eta \cdot \cos \varphi = 0,7$.

Решение.

Установленная мощность:

$$P_{\text{у}} = P_{\text{н1}} + P_{\text{н2}} + P_{\text{н3}} = 4,5 + 2,8 + 3,5 = 10,8 \text{ кВт}$$

Расчетный ток магистрали

$$I_{\text{р}} = \frac{K_{\text{с}} \cdot P_{\text{у}} \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{0,9 \cdot 10,8 \cdot 1000}{1,73 \cdot 220 \cdot 0,7} = 35 \text{ А}$$

Используя справочные данные выбираем алюминиевый провод, проложенный открыто, сечением $S = 6 \text{ мм}^2$ с допустимой токовой нагрузкой:

$$I_{\text{д}} = 39 \text{ А} > 35 \text{ А}$$

Выбранное сечение проверяем по потере напряжения.

Мощность в цепи питания двигателей при их номинальной нагрузке:

$$P = \frac{P_{н1}}{\eta_1} + \frac{P_{н2}}{\eta_2} + \frac{P_{н3}}{\eta_3} = \frac{4,5}{0,85} + \frac{2,8}{0,85} + \frac{3,5}{0,85} = 5,3 + 3,3 + 4,1 = 12,7 \text{ кВт}$$

Расчетная мощность:

$$P_p = K_c \cdot P = 0,9 \cdot 12,7 = 11,5 \text{ кВт}$$

Определяем относительную потерю напряжения по формуле

$$\varepsilon = \frac{100 \cdot P_p \cdot l}{\gamma \cdot S \cdot U_{л}^2} = \frac{100 \cdot 11,5 \cdot 1000 \cdot 15}{35 \cdot 6 \cdot 220^2} = 1,7\%$$

где γ – удельная проводимость для алюминия:

$$\gamma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{0,029} = 35 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$$

Таким образом, $\varepsilon = 1,7\%$ не превышает допустимой, и, следовательно, провод сечением $S = 6 \text{ мм}^2$ выбран правильно.

Порядок выполнения работы:

1. Отметьте в отчете наименование и цель занятия.
2. Отметьте в отчете исходные условия задачи и заданную схему. Условия задачи и схемы цепей приведены в приложении.
3. Выполните предложенное задание. По необходимости, при выполнении задания практической работы, повторите теоретический материал и примеры, подобные заданию практической работы.

Задание

Рабочая машина приводится в действие с помощью двух трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором.

Используя справочные данные, данные для своего варианта, указанные в таблице 5.1, выбрать для двигателя пусковую и защитную аппаратуру.

Начертить в соответствии с требованиями ГОСТ принципиальную электрическую схему управления электродвигателем.

Таблица 5.1.

Номер двигателя	Тип двигателя	$P_{ном2}, \text{ кВт}$	$I_{ном}, \text{ А}$	$\frac{I_{п}}{I_{ном}}$	$\cos\varphi_{ном}$	$\eta_{ном}$
1	4А100S2У3	4	8	7,5	0,89	0,86
2	4А100L2У3	5,5	11	7,5	0,91	0,87
3	4А112М2СУ3	7,5	15	7,5	0,88	0,87
4	4Л132М2СУ3	11	21	7,5	0,9	0,88
5	4А90L4У3	2,2	5	6,0	0,83	0,8
6	4А100S4У3	3	7	6,5	0,83	0,82
7	4А100L4У3	4,0	9	6,5	0,84	0,84

Номер двигателя	Тип двигателя	$P_{ном2},$ кВт	$I_{ном}, A$	$\frac{I_{п}}{I_{ном}}$	$\cos\varphi_{ном}$	$\eta_{ном}$
8	4A112M4CY1	5,5	12	7,0	0,85	0,85
9	4A132M4CY1	11	22	7,5	0,87	0,87
10	4AP160S4Y3	15	30	7,5	0,87	0,865
11	4AP160M4Y3	18,5	37	7,5	0,87	0,885
12	4AP180S4Y3	22	43	7,5	0,87	0,89
13	4AP180M4Y3	30	58	7,5	0,87	0,9
14	4A100L6Y3	2,2	6	5,5	0,73	0,81
15	4AP160S6Y3	11	24	7,0	0,83	0,855
16	4AP160M6Y3	15	31	7,0	0,83	0,875
17	4AP180M6Y3	18,5	40	6,5	0,8	0,87
18	4A250S6Y3	45	84	6,5	0,89	0,92
19	4A250M6Y3	55	102	7,0	0,89	0,92
20	4AH250M6Y3	75	141	7,5	0,87	0,93
21	4A100L8Y3	1,5	5	6,5	0,65	0,74
22	4AP160S8Y3	7,5	18	6,5	0,75	0,86
23	4A250S8Y3	37	75	6,0	0,83	0,9
24	4A250M8Y3	45	90	6,0	0,84	0,91
25	4AH250M8Y3	55	111	6,0	0,82	0,92

Занятие № 6. Исследование одно- и двухполупериодных выпрямителей. Графики выпрямления переменного тока

Цель занятия

Исследование одно- и двухполупериодных выпрямительных устройств, сравнение полученных экспериментальных данных с теоретическими, анализ работы сглаживающих фильтров, снятие внешних характеристик.

Порядок выполнения

1. Собрать схему, согласно рис. 6.1, для исследования выпрямительных устройств.

2. Подключить источник регулируемого переменного напряжения, с помощью которого установить напряжение на выходе выпрямительного устройства $U_1 = 220$ В и при проведении опытов поддерживать его неизменным.

3. Исследовать выпрямитель, собрать по однополупериодной схеме при работе без сглаживающих фильтров. При этом выключатели В₃ и В₄ в цепях конденсаторов разомкнуты, выключатель В₅ в шунтирующей цепи

дросселя и выключатель B_6 в цепи нагрузки – замкнуты, выключатель B_2 – разомкнут, выключатель B_1 в положении $\text{—}\overline{\text{—}}$.

4. Записать показания всех измерительных приборов в табл. 6.1 и зарисовать в принятом масштабе осциллограмму с экрана осциллографа.

5. Произвести исследования, аналогичные п. 4, снимая осциллограмму с экрана осциллографа и записывая в табл. 6.1 показания всех приборов при включении в схему выпрямителя:

а) индуктивного (дроссельного) сглаживающего фильтра (выключатель B_5 разомкнут);

б) емкостного сглаживающего фильтра (дроссель замкнут, выключатель B_5 замкнут, выключатели B_3 и B_4 включены);

в) индуктивно-емкостного ($L_\Phi - C_\Phi$ – типа) Γ – образного сглаживающего фильтра (выключатель B_3 – разомкнут);

г) индуктивно-емкостного ($C_\Phi - L_\Phi - C_\Phi$ типа) Π – образного сглаживающего фильтра.

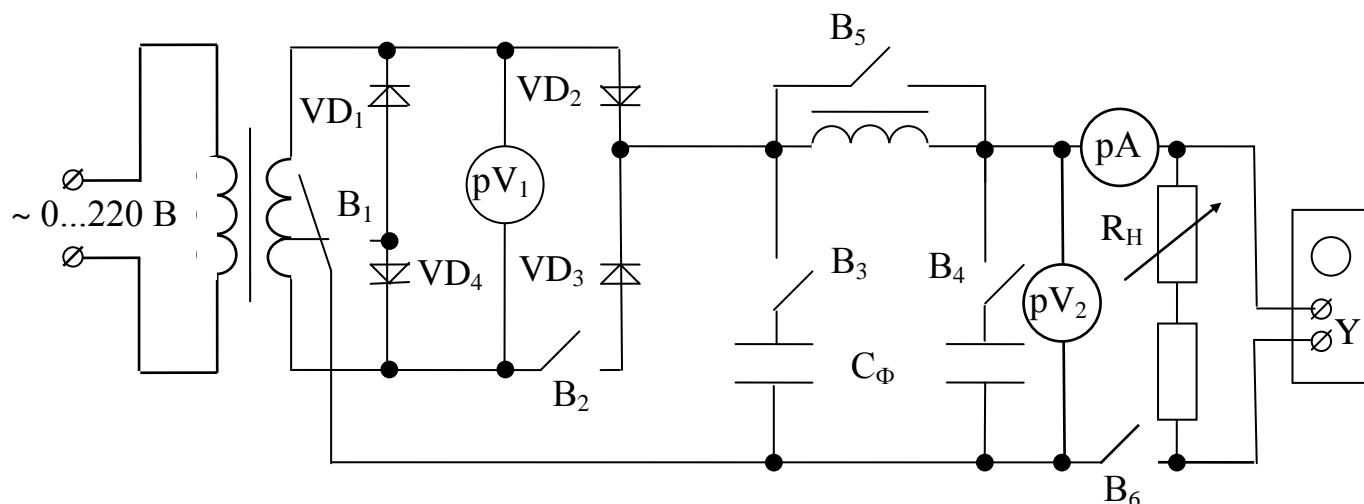


Рис. 6.1

6. Исследовать двухполупериодную одноактную схему выпрямителя (выключатель B_2 замкнут) и провести те же измерения, что и при однополупериодном выпрямлении. Записать показания всех измерительных приборов в табл. 6.2, аналогичную табл. 6.1.

7. Исследовать двухполупериодных двухтактный выпрямитель (мостовую выпрямительную схему). Выключатель B_1 переключить в положение $\text{—}\overline{\text{—}}$, уменьшить вдвое напряжение на вторичной обмотке трансформатора. Произвести те же опыты, что и в п. 5 и 6. Записать показания трансформатора. Записать показания всех измерительных приборов в табл. 6.3, аналогичную табл. 6.1 и 6.2.

8. Обработать результаты измерений. Для всех выпрямительных схем сравнить расчетные значения выпрямительного напряжения U_{dp} и тока I_{dp} на нагрузке с измеренными значениями U_d и I_d .

Таблица 6.1

№ п/п	Тип фильтра	Измерено				Вычислено				
		U_1	$2U_2$	U_d	I_d	R_H	U_{2m}	q	U_{dp}	I_{dp}
		В	В	В	А	Ом	В	-	В	А
1	—									
2	L_Φ									
3	C_Φ									
4	$L_\Phi - C_\Phi$									
5	$C_\Phi - L_\Phi - C_\Phi$									

Домашнее задание

Изучить свойства полупроводниковых выпрямительных диодов и вид их вольтамперных характеристик; ознакомиться с принципом работы однополупериодного выпрямителя и мостового двухполупериодного выпрямительного устройства; ознакомиться с принципом сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения.

Контрольные вопросы

1. Поясните назначение выпрямительных устройств.
2. Требования, предъявляемые к диодам, используемым в выпрямителях.
3. Назовите основные типы однофазных выпрямительных схем.
4. Объясните отличие однотактной схемы выпрямления от двухтактной схемы.
5. Поясните принцип действия одно- и двухполупериодных схем выпрямления.
6. Назовите основные виды сглаживающих фильтров.
7. Поясните, в каких случаях целесообразно использовать индуктивные, а в каких — емкостные фильтры или их сочетания.
8. Каково значение коэффициента пульсации напряжения или тока исследуемых выпрямительных схем?

Литература

[2, §10.6; 4, §15.2].

Занятие № 7. Расчет схемы одно- и двухполупериодных выпрямителей. Определение величины коэффициента сглаживания и коэффициента выпрямления схемы, при различных конфигурациях схем выпрямления

Цель занятия

Научится рассчитывать схемы одно- и двухполупериодных выпрямителей. Определять величины коэффициента сглаживания и коэффициента выпрямления схемы, при различных конфигурациях схем выпрямления.

Выбор схемы выпрямителя

Для мощностей $P_d < 1$ кВт следует использовать схемы выпрямления однофазного тока. Среди двухполупериодных однофазных схем более высокие технико-экономические показатели имеет мостовая схема. Она обеспечивает лучшее использование трансформатора и вентиля, применяется даже при больших мощностях, допустимых для однофазной нагрузки сети.

Если выпрямитель должен отдавать потребителю мощность более 1 кВт, то оптимальным будет использование выпрямителей трехфазного тока. Трехфазная схема выпрямителя с нулевым выводом применяется на средних мощностях (1÷10 кВт), а также в случаях, когда допустима большая амплитуда переменной составляющей выпрямленного напряжения. При больших мощностях ($P_d > 10$ кВт), а также при допустимых пульсациях менее 5 % целесообразно использовать мостовую схему выпрямления (схему Ларионова). При выборе схемы выпрямителя следует учесть, что нередко приходится просчитывать несколько вариантов схем, чтобы выбрать наиболее оптимальное техническое решение.

Выбор типа вентиля (диодов)

Выбор типа вентиля осуществляется на основании предварительной оценки следующих параметров выпрямителя:

среднего значения тока через вентиль при полной нагрузке I_a , которое выбирается из табл. 7.1;

максимального значения обратного напряжения на вентиле $U_{обр\ m}$ (определяется из табл. 7.1), при этом параметр U_d оценивается по выражению:

$$U_d \approx U_{d\ n} + \Delta U,$$

где ΔU – потери напряжения из-за протекания тока $I_d > 0$, имеющие порядок от $0,05U_d$ (при выпрямленной мощности $P_d > 100$ кВт) до $0,15U_d$ (при мощности $P_d < 1$ кВт).

Величины I_a и $U_{обр\ m}$ не должны превышать значений соответствующих паспортных параметров выбранного вентиля – номинального прямого тока I_a и обратного допустимого напряжения $U_{обр\ доп}$, т. е.

$$\begin{cases} (1,1, \dots, 1,4)I_a < I_{a\ n}; \\ (1,1, \dots, 1,4)U_{обр\ m} < U_{обр\ доп}. \end{cases}$$

Коэффициент использования по току:

$$k_i = \frac{I_a}{I_{aн}}$$

при выборе вентиля должен находиться на интервале $(0,5 \div 0,8)$. Для уменьшения прямого тока I_a применяется параллельное включение однотипных вентилях (рис. 7.1, а). Последовательное соединение применяется в тех случаях, когда максимальное обратное напряжение $U_{обр м}$ превышает допустимое обратное напряжение $U_{обр доп}$ отдельных вентилях (рис. 7.1, б). Прямое r_a и обратное $R_{обр}$ сопротивления отдельных вентилях отличаются от номинальных значений из-за наличия технологических погрешностей. С целью выравнивания токов параллельно включенных вентилях или обратных напряжений на последовательно включенных вентилях применяются выравнивающие сопротивления $R_{доб}$ и $R_{ш}$.

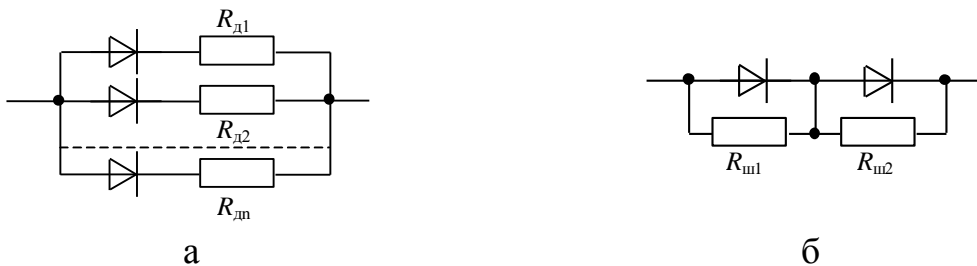


Рис. 7.1. Использование выравнивающих сопротивлений:

а – $R_{доб} = (2 \div 5)r_a$; б – $R_{ш} = (0,1 \div 0,2) R_{обр}$

После уточнения значения напряжения холостого хода $U_{д х.х}$ и определения параметра $I_{а м}$ (см. табл. 7.1), окончательно проверяется нагрузочная способность выбранного типа вентиля по обратному напряжению и прямому току.

Выбор схемы фильтра и ее расчет

В тех случаях, когда требуется получить коэффициент сглаживания $S > 20$, применяют Г-образные LC-фильтры. Коэффициент сглаживания такого фильтра

$$S = 40 f_{о.г}^2 L_{\phi} C_{\phi}.$$

При заданном значении S определяем произведение $L_{\phi} C_{\phi} = \frac{S}{40 f_{о.г}^2}$ и рассчитываем минимальное значение индуктивности дросселя, Гн:

$$L_{\phi \min} = (1,3 \div 2,0) \frac{R_H a_1}{2\pi f_c},$$

где a_1 – коэффициент (для схем, приведенных на рис. 2, 4 и 6, коэффициент a_1 составляет 0,332; 0,083 и 0,01 соответственно); f_c – частота сети.

Определяем значение емкости конденсатора, мкФ:

$$C_{\phi} > \frac{S}{40 f_{0.Г}^2 L_{\phi \min}}.$$

Необходимый коэффициент сглаживания S определяется как отношение коэффициента пульсаций на входе и выходе фильтра. Значение первого находится из таблиц для выбранной схемы выпрямителя, второго – из исходных данных на проектирование схемы. При невысоких значениях коэффициентов сглаживания используются простейшие фильтры: индуктивность и емкость. При значениях коэффициентов сглаживания, превышающих несколько десятков, целесообразно использовать Г- или П-образный фильтр, содержащий два звена.

Расчет параметров выпрямителя

Если нагрузка выпрямителя носит индуктивный характер (например, Г-образный фильтр с индуктивностью), то вначале вычисляется значение напряжения холостого хода $U_{d \text{ х.х.}}$. Омические сопротивления дросселя $r_{др}$ и трансформатора R_T находятся из зависимостей, представленных на рис. 7.2.

В маломощных выпрямителях можно пренебречь сопротивлением индуктивности рассеивания x_s , а в выпрямителях большой и средней мощности – активным сопротивлением R_T обмотки трансформатора. После определения напряжения U_d находятся прочие параметры выпрямителя.

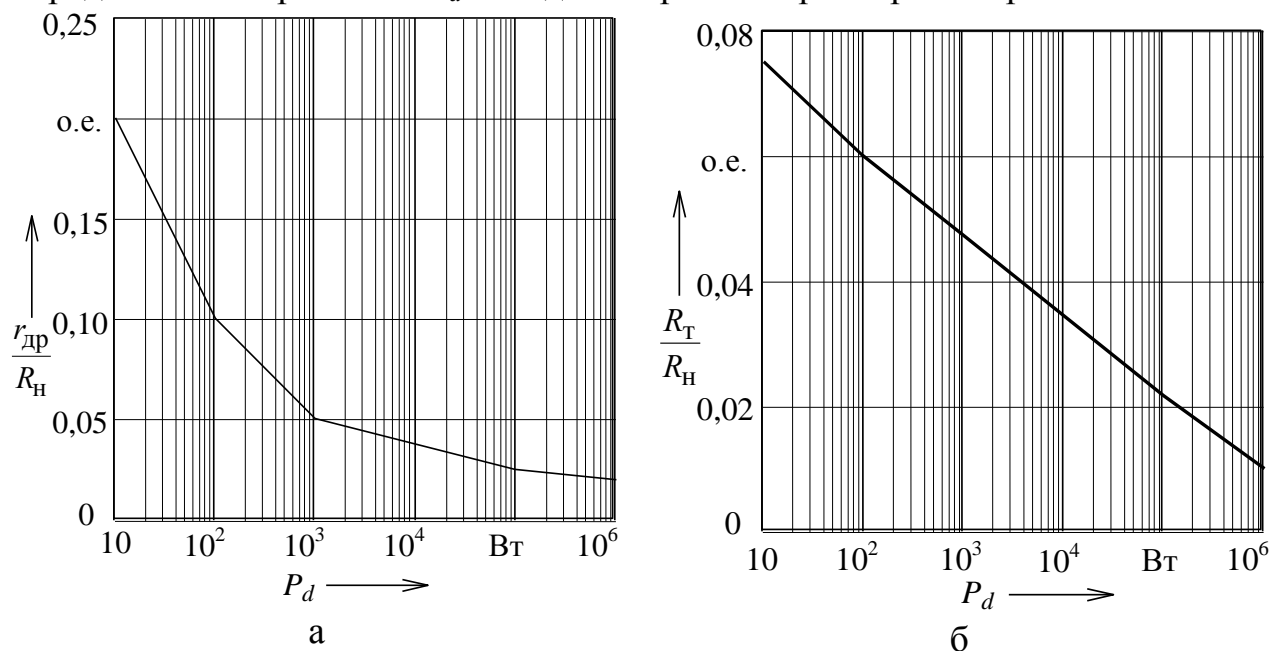


Рис. 7.2. Аппроксимированные графики зависимостей сопротивлений $r_{др}$ и R_T

Пример расчета

Рассчитать выпрямитель по следующим исходным данным: номинальное выпрямленное напряжение $U_{dн} = 1000$ В, номинальный выпрямленный ток $I_{dн} = 10$ А, коэффициент пульсаций на выходе $k_{п \text{ вых}} = 0,03$, напряжение сети $U_c = 220$ В с частотой $f_c = 50$ Гц.

Выбор схемы выпрямителя

Определим сопротивление нагрузки:

$$R_n = U_{dн} / I_{dн}; R_n = 1000 / 10 = 100 \text{ Ом.}$$

Выпрямленная мощность:

$$P_d = U_{dн} \cdot I_{dн}; P_d = 1000 \cdot 10 = 10\,000 \text{ Вт.}$$

При мощностях, превышающих 1 кВт, рекомендуется применять выпрямители трехфазного тока. Для уменьшения размеров трансформатора и фильтра выбираем схему Ларионова, имеющую высокие технико-экономические показатели.

Выбор вентиляей

Для выбранной схемы определим средний ток через диод:

$$I_a = \frac{I_{dн}}{3}; I_a = \frac{10}{3} = 3,33 \text{ А.}$$

Ориентировочное значение обратного напряжения на вентиле $U_{обр м} > 1,045 U_{dн}$.

Принимаем $U_{обр м} = 1,1 \cdot 1,045 U_{dн}$; $U_{обр м} = 1,1 \cdot 1,045 \cdot 1000 = 1150 \text{ В.}$

По справочным данным выбираем тип вентиля из таблицы прил. 2. В данном случае подходит диод типа Д234Б (12 вентиляей, по два последовательно соединенных вентиля в каждом плече моста), который имеет следующие параметры: номинальный прямой ток $I_{ан} = 5 \text{ А}$; прямое падение напряжения $U_a = 1,5 \text{ В}$; допустимое обратное напряжение $U_{обр доп} = 600 \text{ В}$; среднее значение обратного тока $I_{обр} = 3 \text{ мА}$.

Рассчитаем значение выравнивающих сопротивлений:

$$R_{ш} = (0,1, \dots, 0,2) R_{обр},$$

$$\text{где } R_{обр} = \frac{U_{обр доп}}{I_{обр}}; R_{обр} = \frac{600}{0,003} = 200\,000 \text{ Ом} = 200 \text{ кОм.}$$

Выбираем $R_{ш} = 0,15 R_{обр}$; $R_{ш} = 0,15 \cdot 200 = 30 \text{ кОм.}$

Выбор и расчет схемы фильтра

В трехфазных схемах выпрямления средней и большой мощности наиболее целесообразно использовать сглаживающий фильтр с индуктивной реакцией, т. е. начинающийся с дросселя. Необходимый коэффициент сглаживания фильтра с учетом явления коммутации

$$S = (1,5, \dots, 2,0) \frac{k_{п вх}}{k_{п вых}},$$

где $k_{п вх}$ – коэффициент пульсаций на выходе вентиляльной группы.

Для трехфазной мостовой схемы выпрямления Ларионова $k_{п} = 0,057$.

Тогда коэффициент сглаживания

$$S = (1,5, \dots, 2,0) \frac{0,057}{0,03} = 4.$$

Поскольку значение коэффициента сглаживания несущественно, выбираем простейший однозвенный L -фильтр.

Для схемы Ларионова $f_{o.r} = 300$ Гц. Тогда индуктивность дросселя

$$L_{\phi} = \frac{4 \cdot 100}{2\pi \cdot 300} = 0,21 \text{ Гн.}$$

Расчет параметров выпрямителя

Прямое сопротивление вентиля

$$r_a = \frac{U_a}{I_{a.n}}; r_a = \frac{1,5}{5} = 0,3 \text{ Ом.}$$

Коэффициенты для значений сопротивлений дросселя и трансформатора определяются по графикам рис. 13 в зависимости от мощности выпрямителя:

$$R_T = 0,037 R_n, R_T = 0,037 \cdot 100 = 3,7 \text{ Ом;}$$

$$r_{др} = 0,034 R_n, r_{др} = 0,034 \cdot 100 = 3,4 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление рассеивания обмотки трансформатора

$$x_s = (0,04 \div 0,1) \frac{100 \cdot 0,43}{0,82} = 2,5 \text{ Ом.}$$

Напряжение холостого хода для схемы Ларионова

$$U_{d.x.x} = 1000 + 10(2 \cdot 2 \times 0,3 + 3,7 + 3,4 + \frac{2,5 \cdot 3}{2 \cdot 3,14}) = 1095 \text{ В.}$$

Параметры трансформатора (с учетом выбранной схемы Ларионова):

– напряжение на вторичной обмотке

$$U_2 = 0,43 U_{d.x.x}; U_2 = 0,43 \cdot 1095 = 471 \text{ В;}$$

– коэффициент трансформации $k = \frac{U_1}{U_2}; k = \frac{220}{471} = 0,467;$

– ток вторичной обмотки $I_2 = 0,82 I_{d.n}; I_2 = 0,82 \cdot 10 = 8,2 \text{ А;}$

– ток первичной обмотки $I_1 = \frac{I_2}{k}; I_1 = \frac{8,2}{0,467} = 17,6 \text{ А;}$

– типовая (габаритная) мощность трансформатора

$$S_{тр} = 1,045 U_{d.n} \cdot I_{d.n}; S_{тр} = 1,045 \cdot 1000 \cdot 10 = 10 \text{ 450 Вт.}$$

Проверим нагрузочную способность выбранных вентилях, определив максимальное значение обратного напряжения:

$$U_{обр.m} = 1,045 U_{d.x.x}; U_{обр.m} = 1,045 \cdot 1095 = 1144 \text{ В.}$$

В данном примере для двух последовательно включенных диодов Д234Б

$$U_{обр.m} < 2U_{обр.доп}; 2U_{обр.доп} = 2 \cdot 600 = 1200 \text{ В.}$$

Следовательно, тип вентилях и схема их включения выбраны правильно.

Внешнюю характеристику выпрямителя (рис. 7.3) $U_d = f(I_d)$, которая представляет собой прямую линию, строим по двум точкам
 точке холостого хода ($U_d = U_{d\text{х.х.}}, I_d = 0$)
 и точке номинальной нагрузки ($U_d = U_{d\text{н.}}, I_d = I_{d\text{н.}}$).

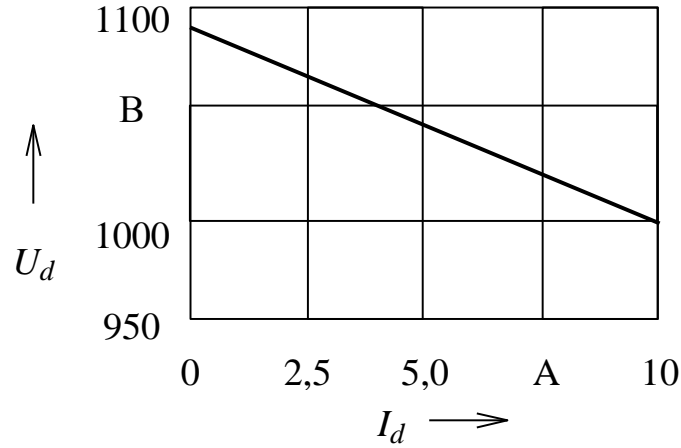


Рис. 7.3. Внешняя характеристика выпрямителя

Таблица 7.1 Варианты задания

Вариант	$I_{d\text{н.}}, \text{A}$	$U_{d\text{н.}}, \text{В}$	$k_{\text{П Вых}}$	Вариант	$I_{d\text{н.}}, \text{A}$	$U_{d\text{н.}}, \text{В}$	$k_{\text{П Вых}}$
1	3	1500	0,003	51	32	180	0,006
2	7	220	0,009	52	21	750	0,004
3	3,8	500	0,005	53	19	315	0,013
4	7	300	0,004	26	5	110	0,003
5	4,2	750	0,005	27	36	445	0,003
6	85	50	0,006	28	29	210	0,008
7	25	400	0,004	29	34	470	0,001
8	4,5	800	0,008	30	125	50	0,008
9	30	60	0,009	31	34	300	0,002
10	50	100	0,013	32	19	350	0,011
11	8,5	100	0,005	33	11	1500	0,002
12	10	900	0,003	34	3	2000	0,003
13	1,5	200	0,003	35	5	14	0,070
14	16	500	0,003	36	28	250	0,006
15	14	200	0,008	37	9	70	0,001
16	3	300	0,005	38	23	740	0,004
17	150	50	0,008	39	9	800	0,011
18	200	50	0,005	40	21	820	0,003
19	300	50	0,010	41	18	400	0,009
20	1,5	500	0,006	42	25	695	0,002
21	50	150	0,002	43	88	190	0,007
22	24	100	0,005	44	96	75	0,003
23	0,6	1500	0,006	45	24	710	0,004
24	1,8	350	0,008	46	19	380	0,010
25	30	200	0,010	47	206	85	0,001

Таблица 7.2 Основные параметры вентиляей

Тип вентиля	$I_{aн}, A$	$U_{обр доп}, B$	U_a, B	$I_{обр}, mA$
2Д201 А,Г	5	100-200	1	3
2Д201 Б,В	10	100-200	1	3
Д202	0,4	100	1	0,5
Д204	0,4	300	1	0,5
Д206	0,1	100	1	0,1
Д208	0,1	300	1	0,1
Д210	0,1	500	1	0,1
Д211	0,1	600	1	0,1
Д214	5	100	1	3
Д214А	10	100	1	3
Д214Б	2	100	1	3
Д215	5	200	1	3
Д215А	10	200	1	3
Д215Б	2	200	1	3
Д217	0,1	800	0,7	0,05
Д218	0,1	1000	0,7	0,05
Д221	0,4	400	1	0,5
Д222	0,4	600	1	0,5
Д226	0,3	400	1	0,03
Д226Д	0,3	200	1	0,1
Д226Е	0,3	100	1	0,1
Д229	0,4	400	1	0,05
Д229А	0,4	200	1	0,05
Д232	10	400	1	3
Д232А	10	400	1	3
Д232Б	5	400	1,5	3
Д233	10	500	1	3
Д233Б	5	500	1,5	3
Д246Б	2	400	1,5	3
Д1010	0,3	2000	11	0,1
ВК2-10	10	100 – 1000	0,5	2
ВК2-25	25	100 – 1000	0,5	5
ВК2-50	50	100 – 1000	0,5	10
ВК2-100	100	100 – 1000	0,5	10
ВК2-200	200	100 – 1000	0,5	20
ВК2В-350	350	100 – 1000	0,5	35
В4-160	160	100 – 600	0,85	20
ВВЛ-0,4	0,4	3000 – 6000	1,7	1,4
ВВЛ-0,6	0,6	3000 – 6000	1,8	1,4
ВВЛ-0,8	0,8	3000 – 6000	1,9	1,4
ВВЛ-1	1	3000 – 6000	2	1,4

Занятие № 8. Исследование формы выходного сигнала электронных генераторов

Цель работы

Целью работы является ознакомление с практическими схемами релаксационных генераторов; изучение условий, обеспечивающих режим самовозбуждения; анализ влияния построения схемы и ее параметров на параметры генерируемых импульсов.

Теоретические сведения

Генераторами являются такие схемы, которые производят периодические колебания различных форм, например, прямоугольные, треугольные, пилообразные и синусоидальные. В генераторах обычно применяются различные активные компоненты, лампы или кварцевые резонаторы, а также пассивные – резисторы, конденсаторы, индуктивности.

Существует два основных класса генераторов – релаксационные и гармонические. Релаксационные генераторы производят треугольные, пилообразные и другие несинусоидальные сигналы

Релаксационные генераторы импульсов используются в качестве задающих частоту работы других устройств, делителей частоты, запускающих и переключающих устройств, генераторов развертки электронного луча осциллографических, радиолокационных и телевизионных трубок.

Усилительный элемент и ОУ в таких генераторах работает в ключевом режиме.

Релаксационные генераторы могут работать в автоколебательном и ждущем режимах, а также в режимах синхронизации и деления частоты.

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему, приведенную на рис. 8.1. В среде моделирования LTSpice

2. Настроить режим моделирования следующим образом:

- a. Stop Time = 0.01
- b. Time to Start saving Data = 0
- c. Maximum Timestep = 1u

Для этого в меню **Simulate** следует выбрать **Edit simulation Cmd**

3. Разместить полученную команду в любом месте схемы

4. В панели управления нажать кнопку «пуск» (или в меню **Simulate** выбрать **Run**), появится пустое окно симуляции. Теперь нужно навести курсор на любой проводник в окне схемы, форма курсора изменится и превратится в щуп, и если кликнуть левой кнопкой мыши, то в окне симуляции появится график осциллограммы напряжения. Что бы добавить на график другую осциллограмму следует кликнуть по другому проводнику, удерживая нажатой клавишу **Ctrl**. Если навести курсор на какой-либо компонент, то форма курсора изменится на токовые клещи, соот-

ответственно клик в таком случае покажет осциллограмму тока, протекающего через данный компонент. Что бы удалить какую-либо осциллограмму с графика, следует воспользоваться ножницами (Функциональная клавиша F5).

5. Снять зависимость колебаний от величины сопротивления резисторов в цепи генератора последовательно изменяя сопротивления резисторов R1, R2, R3.

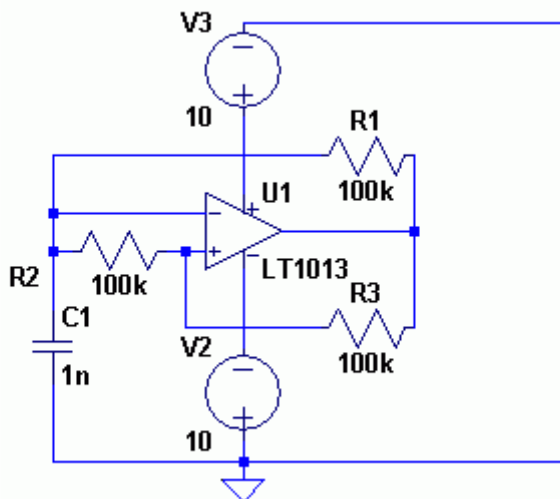


Рис. 8.1. Схема релаксационного генератора

Отчет о работе должен содержать:

1. Электрическую схему генератора.
2. Полученные осциллограммы.
3. Выводы о влиянии сопротивлений на генератор.

Контрольные вопросы

1. Что такое генератор электрических сигналов?
2. Приведите классификацию генераторов электрических сигналов.
3. На какой элементной базе могут строиться генераторы?
4. В чем преимущества и недостатки генераторов на ОУ?
5. Принцип действия релаксационного генератора на ОУ.
6. В чем заключаются отличия релаксационных генераторов от гармонических?

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-cepi-425470>.
5. Киселев, В. И. Электротехника и электроника: в 3 т. Т. 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>.