

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования

**«МОГИЛЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ПРОДОВОЛЬСТВИЯ»**

Кафедра «Автоматизации технологических процессов и производств»

## **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

### **Методические указания к практическим занятиям**

для студентов специальностей

1 - 36 09 01 Машины и аппараты пищевых производств

1 - 36 20 01 Низкотемпературная техника

дневной и заочной форм обучения

Могилев 2016

УДК 621.313.333

Рассмотрено и рекомендовано к изданию  
на заседании кафедры автоматизации технологических  
процессов и производств  
Протокол № от 17.02. 2016г.

Составитель  
старший преподаватель  
Т.Р. Скапцова

Рецензент  
кандидат технических наук, доцент  
М.М. Кожевников

УДК 621.313.333

© Учреждение образования  
«Могилевский государственный  
университет продовольствия», 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Линейные электрические цепи постоянного тока с одним источником электрической энергии	4
2 Многоконтурные линейные электрические цепи постоянного тока с несколькими источниками электрической энергии	10
3 Линейные электрические цепи однофазного переменного тока с последовательным соединением элементов	15
4 Линейные электрические цепи однофазного переменного тока с параллельным соединением элементов	20
5 Электрические цепи трехфазного тока	24
6 Асинхронные трехфазные двигатели	28
7 Электропривод	31
Приложение	39
Список литературы	43

## **ВВЕДЕНИЕ**

Основой глубоких и долговременных знаний является систематическая самостоятельная работа студентов над курсом равномерно в течение всего семестра, не заучивание, как стихотворений, законов, формул, методов расчета, а активное применение их к анализу и решению практических задач. Термин «студент знает» означает не только умение пересказывать то, что студент услышал на лекции или узнал из учебников, а умение применить теорию к решению и анализу практических задач.

Для успешного усвоения учебного материала и облегчения решения задач в начале каждого раздела изложены основные теоретические положения. Задачи сопровождаются подробными решениями, что важно для студентов – заочников, изучающих дисциплину «Электротехника» самостоятельно. В методическом указании представлен также ряд задач, которые можно использовать для самостоятельной работы студентов.

### **1 ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ОДНИМ ИСТОЧНИКОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

#### **1.1 Основные теоретические положения**

Электрическая цепь совокупность устройств, предназначенных для получения, передачи, преобразования и использования электрической энергии.

Электротехнические устройства, входящие в электрическую цепь называются элементами цепи. Основные элементы электрической цепи – источники и приемники (потребители) электрической энергии, вспомогательные – электроизмерительные приборы, устройства защиты и управления.

Источники питания – активные элементы цепи, приемники – пассивные элементы.

Электрическая цепь называется линейной, когда сопротивления всех ее элементов не зависят от величины протекающего по ним тока или от напряжения на их зажимах.

Часть электрической цепи, содержащую выделенные в ней элементы, называют участком цепи. Участок электрической цепи, содержащий источник электроэнергии – активный участок, не содержащий источника электроэнергии – пассивный участок.

Направленное движение свободных заряженных частиц в проводнике под действием электрического поля называется электрическим током проводимости.

Интенсивность электрического тока оценивается физической величиной, которая называется силой электрического тока.

Постоянным называется электрический ток, сила и направление которого, не изменяются с течением времени.

При движении по проводнику свободные электроны сталкиваются с атомами вещества проводника. В результате столкновений они теряют часть своей кинетической энергии. При этом проводник нагревается, т.е. происходит преобразование электрической энергии в тепловую энергию. Таким образом, электрическое сопротивление проводника можно характеризовать, как его способность препятствовать прохождению электрического тока.

Электрическое сопротивление проводника постоянному току называется омическим и обозначается согласно ГОСТ буквой  $R$ , в системе СИ за единицу измерения принят Ом. Величина сопротивления, которое оказывает проводник движению электронов, зависит от их количества в единице объема и от взаимного расположения атомов в материале проводника.

Электротехнические устройства, обладающие сопротивлением  $R$  и применяемые для ограничения или регулирования тока, называются резисторами.

Величина, обратная сопротивлению проводника, называется проводимостью и обозначается согласно ГОСТ буквой  $g$ , в системе СИ за единицу измерения принят См (сименс):

$$g = \frac{1}{R} \quad (1)$$

Ток, текущий по элементам создает на каждом из них напряжение:

$$U = R I \quad (2)$$

### Закон Ома для простейшей электрической цепи

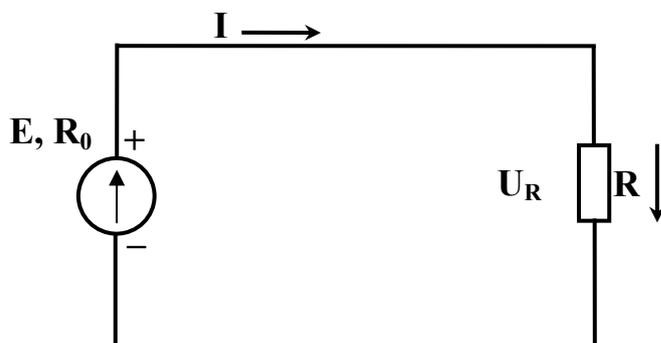


Рисунок 1 – Схема простейшей электрической цепи постоянного тока

На рисунке 1 представлена простейшая неразветвленная электрическая цепь, где  $E$  – электродвижущая сила источника энергии,  $R_0$  – внутреннее сопротивление источника,  $R$  – сопротивление внешнего участка цепи или сопротивление приемника энергии,  $I$  – сила тока в цепи.

Все перечисленные величины связаны друг с другом. Эта связь впервые была установлена в 1827 г. немецким физиком Г.С. Омом и называется законом Ома, который для простейшей электрической цепи формулируется следующим образом: сила тока в цепи прямо пропорциональна ЭДС источника

электрической энергии и обратно пропорциональна общему сопротивлению всей цепи:

$$I = \frac{E}{R + R_0} \quad (3)$$

### Закон Ома для активного участка электрической цепи

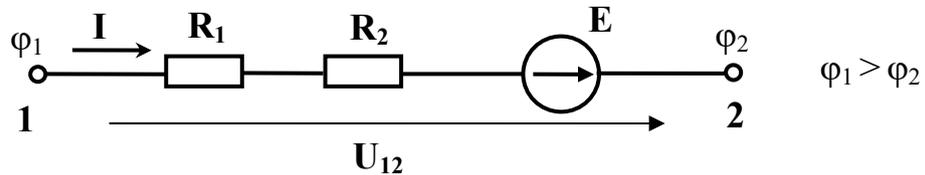


Рисунок 2 – Схема активного участка электрической цепи

$$I = \frac{\pm \sum E \pm U_{12}}{\sum R} \quad (4)$$

Выше представленное уравнение выражает обобщенный закон Ома для активного участка цепи, согласно которому ток активного участка цепи равен алгебраической сумме его ЭДС и напряжения, деленной на сопротивление участка.

ЭДС и напряжение берут со знаком плюс, если их направления совпадают с направлением тока, и со знаком минус, когда их направления противоположны направлению тока.

### Закон Ома для пассивного участка электрической цепи

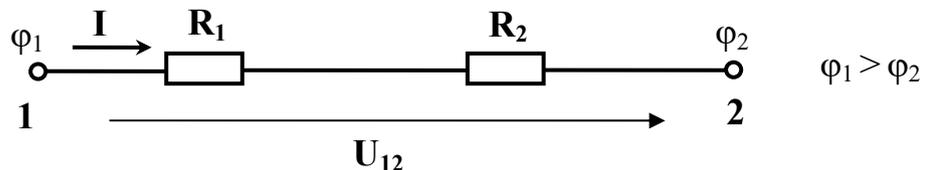


Рисунок 3 – Схема пассивного участка электрической цепи.

Ток в пассивном участке цепи прямо пропорциональна напряжению, приложенному к этому участку, и обратно пропорциональна его сопротивлению:

$$I = \frac{U_{12}}{\sum R} \quad (5)$$

Важнейшей характеристикой электротехнических устройств является их мощность.

Мощность – это работа, выполненная тем или иным устройством за единицу времени.

Мощность, вырабатываемая источником электрической энергии:

$$P_{ист} = E I \quad (6)$$

Мощность, потребляемая приемником электрической энергии:

$$P_{\text{ПР}} = R I^2 = U I \quad (7)$$

Из закона сохранения энергии следует, что мощность источников в любой момент времени равна сумме мощностей всех приемников:

$$P_{\text{ИСТ}} = \sum E I = P_{\text{ПР}} = \sum R I^2 \quad (8)$$

Это соотношение носит название уравнения баланса мощности. Произведение  $E I$  подставляют в него со знаком плюс, когда направления ЭДС и тока источника совпадают, и со знаком минус, когда они не совпадают.

Электрические цепи с последовательно-параллельным соединением приемников энергии и одним источником электрической энергии называются простыми цепями.

Последовательным называют такое соединение элементов цепи, при котором условный конец каждого предыдущего элемента соединяют с условным началом только одного последующего элемента. Сила тока во всех последовательно соединенных элементах одинакова.

Ряд последовательно соединенных сопротивлений можно заменить эквивалентным (общим) сопротивлением (рисунок 4).

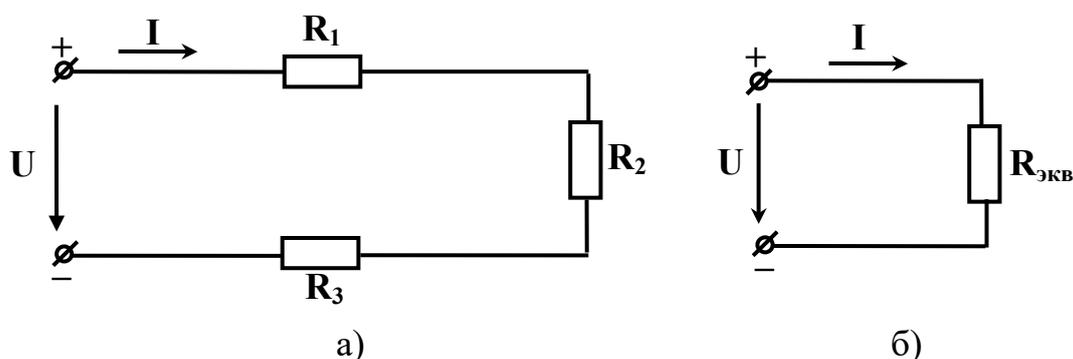


Рисунок 4 – Схема электрической цепи с последовательным соединением сопротивлений а) и ее эквивалентная схема б)

Эквивалентное сопротивление последовательного соединения элементов:

$$R_{\text{ЭКВ}} = R_1 + R_2 + \dots + R_N \quad (9)$$

Параллельным называют такое соединение элементов цепи, при котором условные начала всех элементов соединяются в один узел, а условные концы – в другой. При параллельном соединении все элементы находятся под одинаковым напряжением, равным напряжению на зажимах цепи:

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_N \quad (10)$$

Ряд параллельно соединенных сопротивлений можно заменить эквивалентным (общим) сопротивлением (рисунок 5).

Эквивалентная проводимость при параллельном соединении равна сумме проводимостей всех параллельных ветвей:

$$g = g_1 + g_2 + \dots + g_N \quad (11)$$

Эквивалентное сопротивление параллельного соединения:

$$R_{\text{ЭКВ}} = \frac{1}{g} \quad (12)$$

Эквивалентное сопротивление двух параллельно соединенных элементов:

$$R_{\text{ЭКВ}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (13)$$

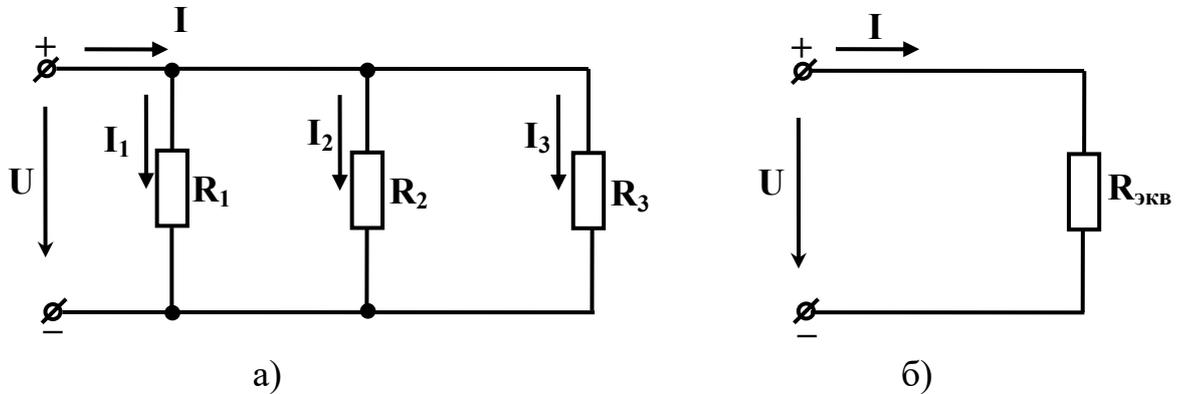


Рисунок 5– Схема электрической цепи с параллельным соединением сопротивлений а) и ее эквивалентная схема б)

При параллельном соединении  $N$  ветвей с равными сопротивлениями в каждой ветви, т.е.  $R_1 = R_2 = \dots = R_N$ :

$$R_{\text{ЭКВ}} = \frac{R_N}{N} \quad (14)$$

Смешанным, называется такое соединение, при котором в цепи имеются группы параллельно и последовательно включенных приемников.

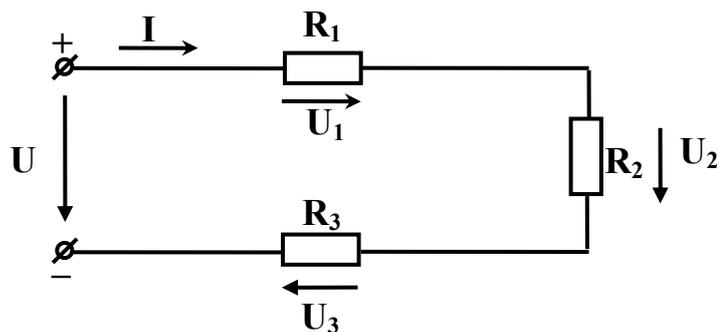
Главной задачей расчета электрической цепи является определение токов элементов цепи. Определив значение тока, легко найти напряжение, мощность. Значения этих величин необходимы для правильного выбора и оценки условия работы элементов цепи (путем сравнения рабочих величин с номинальными величинами).

## 1.2 Типовые задачи с решениями

### ЗАДАЧА 1

В цепи известны сопротивления резисторов  $R_1=10$  Ом,  $R_2=20$  Ом, общее напряжение  $U=100$  В и мощность на первом резисторе  $P_1=10$  Вт.

Определить сопротивление резистора  $R_3$  и общую мощность цепи  $P$ .



Зная мощность на первом резисторе, определим ток, протекающий по всем элементам цепи:

$$I = \sqrt{\frac{P_1}{R_1}} = \sqrt{\frac{10}{10}} = 1 \text{ A}$$

Рассчитаем эквивалентное сопротивление цепи из закона Ома:

$$R_{\text{ЭКВ}} = \frac{U}{I} = \frac{100}{1} = 100 \text{ Ом}$$

Эквивалентное сопротивление последовательного соединения равно сумме всех сопротивлений:

$$R_{\text{ЭКВ}} = R_1 + R_2 + R_3$$

Определим сопротивление  $R_3$ :

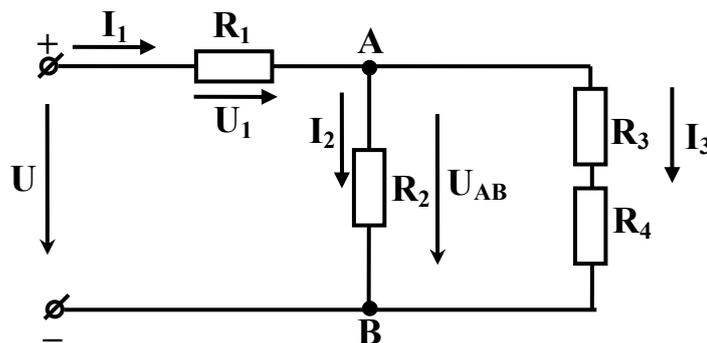
$$R_3 = R_{\text{ЭКВ}} - (R_1 + R_2) = 100 - (10 + 20) = 70 \text{ Ом}$$

Определим общую мощность цепи  $P$ :

$$P = U I = 100 \times 1 = 100 \text{ Вт}$$

## ЗАДАЧА 2

Определить эквивалентное сопротивление, токи и мощность цепи, если заданы сопротивления резисторов  $R_1=15 \text{ Ом}$ ,  $R_2=30 \text{ Ом}$ ,  $R_3=20 \text{ Ом}$ ,  $R_4=10 \text{ Ом}$  и общее напряжение  $U=120 \text{ В}$ .



Путем преобразований найдем эквивалентное сопротивление цепи. Сопротивления  $R_3$  и  $R_4$  соединены последовательно:

$$R_{34} = R_3 + R_4 = 20 + 10 = 30 \text{ Ом}$$

Сопротивления  $R_2$  и  $R_{34}$  соединены параллельно ( $R_2=R_{34}$ ):

$$R_{2,34} = \frac{R_2 R_{34}}{R_2 + R_{34}} = \frac{R_2}{2} = \frac{30 \times 30}{30 + 30} = 15 \text{ Ом}$$

Сопротивления  $R_1$  и  $R_{2,34}$  соединены последовательно:

$$R_{\text{ЭКВ}} = R_1 + R_{2,34} = 15 + 15 = 30 \text{ Ом}$$

Определим общий ток  $I_1$  (в неразветвленной части цепи):

$$I_1 = \frac{U}{R_{\text{ЭКВ}}} = \frac{120}{30} = 4 \text{ A}$$

Определим напряжение  $U_{AB}$ :

$$U_{AB} = R_{2,34} I_1 = 15 \times 4 = 60 \text{ В.}$$

Так как сопротивления  $R_2$  и  $R_{34}$  соединены параллельно,  $U_2 = U_{34} = U_{AB}$ .

Определим ток  $I_2$ :

$$I_2 = \frac{U_{AB}}{R_2} = \frac{60}{30} = 2 \text{ A}$$

Определим ток  $I_3$ :

$$I_3 = \frac{U_{AB}}{R_{34}} = \frac{60}{30} = 2 \text{ A}$$

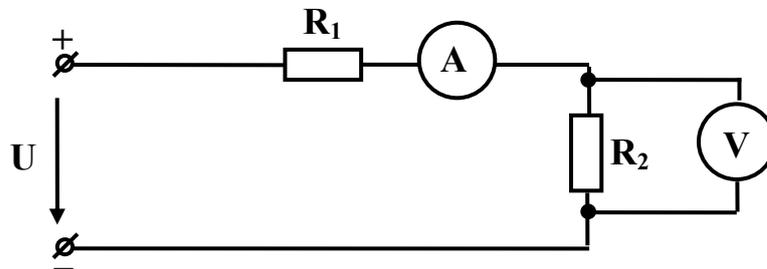
Определим общую мощность цепи  $P$ :

$$P = R_{\text{ЭКВ}} I_1^2 = 30 \times 4^2 = 480 \text{ Вт}$$

### 1.3 Задачи для самостоятельного решения

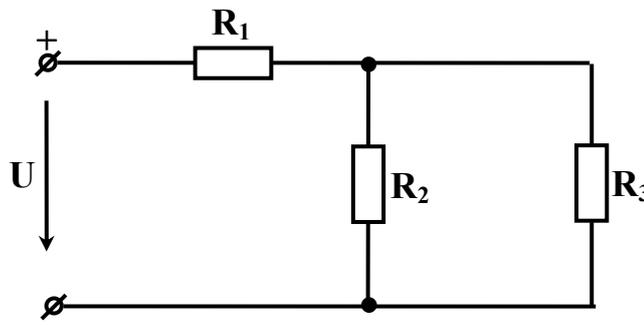
#### ЗАДАЧА 1

Показание приборов в схеме – амперметра – 2 А, вольтметра – 100 В. Определить эквивалентное сопротивление цепи и напряжение источника, если сопротивление резистора  $R_1 = 20 \text{ Ом}$ .



#### ЗАДАЧА 2

Определить ток в ветвях электрической цепи, мощность, потребляемую каждым потребителем и мощность всей цепи, если сопротивления резисторов  $R_1=18 \text{ Ом}$ ,  $R_2=30 \text{ Ом}$ ,  $R_3=20 \text{ Ом}$  и общее напряжение  $U=120\text{В}$ .



## 2 МНОГОКОНТУРНЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА С НЕСКОЛЬКИМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

### 2.1 Основные теоретические положения

Электрические цепи с несколькими контурами, состоящими из разных ветвей с произвольным размещением приемников и источников энергии,

называются сложными электрическими цепями. При расчете сложных электрических цепей используют понятия: узел, ветвь, контур цепи.

**Ветвь** – участок цепи, заключенный между двумя узлами. Ветвь может содержать один или несколько последовательно соединенных элементов. Ток во всех элементах, образующих ветвь, имеет одинаковое значение.

**Узел** – точка, в которой сходятся не менее трех ветвей.

**Контур** электрической цепи – замкнутая фигура образованная ветвями электрической цепи.

**Первый закон Кирхгофа** справедлив для узлов цепи и формулируется так: алгебраическая сумма токов, сходящихся в любом узле электрической цепи, равна нулю:

$$\sum I = 0 \quad (15)$$

**Второй закон Кирхгофа** справедлив для замкнутых контуров цепи и формулируется так: в любом замкнутом контуре алгебраическая сумма ЭДС равна алгебраической сумме напряжений на всех элементах данного контура:

$$\sum E = \sum U = \sum R I \quad (16)$$

### Метод непосредственного применения законов Кирхгофа.

Классическим приемом расчета сложных цепей является непосредственное применение законов Кирхгофа. Методом непосредственного применения законов Кирхгофа можно рассчитать любую электрическую цепь.

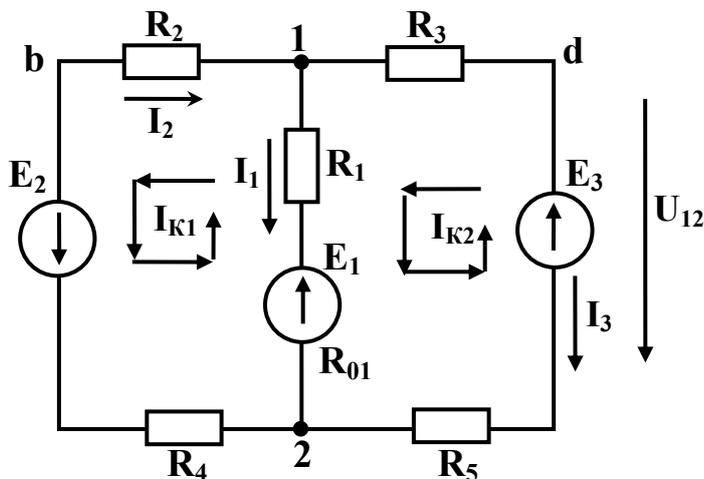


Рисунок 6 – Схема двухконтурной электрической цепи

Расчет цепей на основании законов Кирхгофа сводится к определению токов по известным ЭДС и сопротивлениям элементов схемы.

Алгоритм расчета:

- задать условно-положительное направление токов в ветвях;
- задать произвольные направления обхода контуров;
- составить  $(y - 1)$  уравнение по первому закону Кирхгофа ( $y$  - число узлов в электрической цепи);
- недостающие уравнения в количестве  $v - (y - 1)$ , где  $v$  - число ветвей, составить по второму закону Кирхгофа для независимых контуров, за

положительные ЭДС и токи принимаются такие, направление которых совпадает с направлением обхода контура.

Составим расчетные уравнения для электрической цепи, изображенной на рисунке 6. Поскольку данная цепь имеет три ветви (1- b-2, 1-2, 1- d-2) с неизвестными токами, необходимо составить три уравнения. Одно по первому закону Кирхгофа для узла 1 и два по второму закону Кирхгофа для двух независимых контуров 1- b-2-1, 1- d-2-1. Независимый контур – контур, внутри которого отсутствуют ветви.

$$\begin{cases} I_2 - I_3 - I_1 = 0 \\ E_1 + E_2 = - (R_2 + R_4) I_2 - (R_1 + R_{01}) I_1 \\ E_3 - E_1 = (R_1 + R_{01}) I_1 - (R_3 + R_5) I_3 \end{cases} \quad (17)$$

Полученную систему решают относительно неизвестных токов.

#### **Метод контурных токов.**

Методом непосредственного применения законов Кирхгофа является универсальным, но при расчете сильно разветвленных цепей приходится решать систему с большим числом уравнений. Более простым является метод контурных токов. Этот метод позволяет уменьшить общее число совместно решаемых уравнений и свести систему к числу уравнений, составленных по второму закону Кирхгофа для независимых контуров.

В основу данного метода положено понятие о контурных токах, расчетных (условных) токах, замыкающихся через все элементы соответствующих контуров.

Алгоритм расчета:

- задать условно-положительное направление токов в ветвях;
- задать направление контурных токов (во всех контурах одинаковое);
- задать направление обхода контуров (он должен совпадать с направлением контурных токов)
- составить уравнения по второму закону Кирхгофа для независимых контуров.

Электрическая цепь, представленная на рисунке 6, имеет два независимых контура 1- b-2-1, 1- d-2-1. По всем элементам каждого из них проходит свой контурный ток  $I_{K1}$ ,  $I_{K2}$ .

Уравнения для контуров 1-b-2-1, 1-d-2-1 будут иметь следующий вид:

$$\begin{cases} E_1 + E_2 = (R_1 + R_{01} + R_2 + R_4) I_{K1} - (R_1 + R_{01}) I_{K2} \\ E_3 - E_1 = (R_1 + R_{01} + R_3 + R_5) I_{K2} - (R_1 + R_{01}) I_{K1} \end{cases} \quad (18)$$

Решив систему уравнений можно найти контурные токи, а по ним токи всех ветвей электрической цепи.

Токи, протекающие в несмежных ветвях электрической цепи, по значению равны соответствующим контурным токам, если направление тока в ветви совпадает с направлением контурного тока, если направление тока в ветви противоположно направлению контурного тока, то он должен быть равен контурному току со знаком минус. Так, токи в несмежных ветвях цепи, изображенной на рисунке 6, будут равны  $I_3 = -I_{K2}$ ,  $I_2 = -I_{K1}$ .

Токи в смежных ветвях равны алгебраической сумме контурных токов, протекающих через смежные ветви. Со знаком плюс должен быть взят тот

контурный ток, направление которого совпадает с направлением тока смежной ветви, контурный ток, направленный в противоположную сторону, должен быть взят со знаком минус. Выражение тока  $I_1$  будет иметь вид  $I_1 = I_{k2} - I_{k1}$ .

Если после совместного решения уравнений значения некоторых токов получаются со знаком минус, то это значит, что в действительности они имеют направления, противоположные указанным на схеме.

### Метод напряжения между двумя узлами

Приемники электрической энергии – лампы, электродвигатели и др. – соединяются параллельно. Очень часто общая мощность включенных потребителей становится больше той мощности, которую может отдать в сеть источник энергии. В таких случаях для увеличения мощности при неизменном напряжении источники энергии включают параллельно. При этом получается сложная электрическая цепь с двумя узлами (рисунок 6).

Алгоритм расчета:

- задать условно-положительное направление токов в ветвях;
- задать условно-положительное направление напряжения между узлами;
- определить напряжение между узлами;
- определить токи во всех ветвях цепи по обобщенному закону Ома.

Формула для определения напряжения между двумя узлами в общем виде:

$$U_{12} = \frac{\sum E g}{\sum g} \quad (19)$$

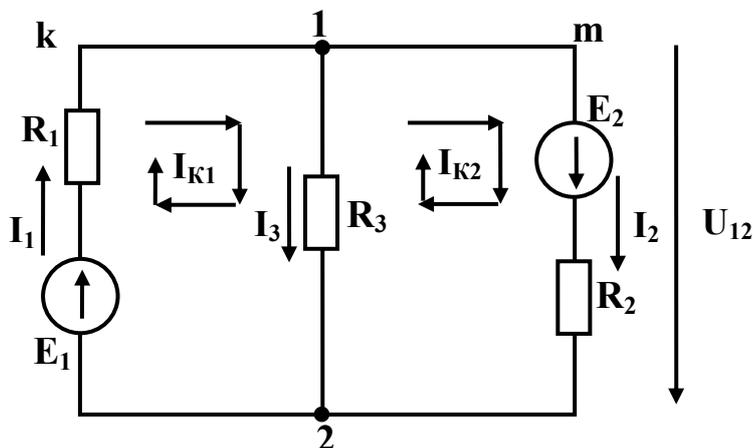
Со знаком плюс в формулу 19 должны входить ЭДС, направленные встречно напряжению  $U_{12}$ , со знаком минус – ЭДС, направленные согласно с напряжением  $U_{12}$ . Знаки в формуле 19 не зависят от направления токов ветвей. Проводимость ветвей определяется по формуле:

$$g = \frac{1}{\sum R} \quad (20)$$

## 2.2 Типовые задачи с решениями

### ЗАДАЧА 1

Определить токи во всех ветвях цепи и составить баланс мощностей, если  $E_1 = 130$  В,  $E_2 = 85$  В,  $R_1 = R_3 = 20$  Ом,  $R_2 = 40$  Ом.



Данную задачу можно решить несколькими методами.

### Метод контурных токов

Направим контурные токи  $I_{K1}$  и  $I_{K2}$  по часовой стрелке, как и обход контуров. На основании второго закона Кирхгофа составляем уравнения для независимых контуров:

$$\begin{cases} E_1 = (R_1 + R_3) I_{K1} - R_3 I_{K2} \\ E_2 = (R_2 + R_3) I_{K2} - R_3 I_{K1} \end{cases}$$

Из уравнений видно, что перед напряжениями  $R_3 I_{K2}$  и  $R_3 I_{K1}$ , вызванными контурными токами, стоит знак минус, так как контурные токи  $I_{K1}$  и  $I_{K2}$  в ветви 1-2 направлены встречно друг другу.

$$\begin{cases} 130 = (20 + 20) I_{K1} - 20 I_{K2} \\ 85 = (40 + 20) I_{K2} - 20 I_{K1} \end{cases}$$

Выразим из первого уравнения системы ток  $I_{K1}$  и подставим во второе уравнение:

$$\begin{aligned} I_{K1} &= \frac{130 + 20 I_{K2}}{40} \\ 85 &= 60 I_{K2} - 20 \frac{130 + 20 I_{K2}}{40} \\ 50 I_{K2} &= 150 \\ I_{K2} &= 3 \text{ А} \\ I_{K1} &= \frac{130 + 20 \times 3}{40} = 4,75 \text{ А} \end{aligned}$$

Токи в несмежных ветвях электрической цепи 1-к 2, 1-м-2, по значению равны соответствующим контурным токам, так как направление токов  $I_1$ ,  $I_2$  совпадает с направлением контурных токов:  $I_1 = I_{K1} = 4,75 \text{ А}$ ,  $I_2 = I_{K2} = 3 \text{ А}$

Ток в ветви 1-2 равен алгебраической сумме контурных токов. Со знаком плюс будет  $I_{K1}$ , его направление совпадает с направлением тока  $I_3$ ,  $I_{K2}$ , направлен противоположно  $I_3$  и будет со знаком минус.

$$I_3 = I_{K1} - I_{K2} = 4,75 - 3 = 1,75 \text{ А}$$

### Метод напряжения между двумя узлами

Зададим направление напряжения между узлами 1 и 2.

Проводимость ветвей:

$$\begin{aligned} g_1 &= \frac{1}{R_1} = \frac{1}{20} = 0,05 \text{ См} \\ g_2 &= \frac{1}{R_2} = \frac{1}{40} = 0,025 \text{ См} \\ g_3 &= \frac{1}{R_3} = \frac{1}{20} = 0,05 \text{ См} \end{aligned}$$

Напряжение между узлами 1 и 2:

$$U_{12} = \frac{E_1 g_1 - E_2 g_2}{g_1 + g_2 + g_3} = \frac{130 \times 0,05 - 85 \times 0,025}{0,05 + 0,025 + 0,05} = 35 \text{ В}$$

Токи в ветвях схемы:

$$I_1 = \frac{E_1 - U_{12}}{R_1} = \frac{130 - 35}{20} = 4,75 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{E_2 + U_{12}}{R_2} = \frac{80 + 35}{40} = 3 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{U_{12}}{R_3} = \frac{35}{20} = 1,75 \text{ A}$$

Составим баланс мощностей.

Мощность, отдаваемая источниками электрической энергии:

$$P_{\text{ист.}} = E_1 I_1 + E_2 I_2 = 130 \times 4,75 + 85 \times 3 = 617,5 + 255 = 872,5 \text{ Вт}$$

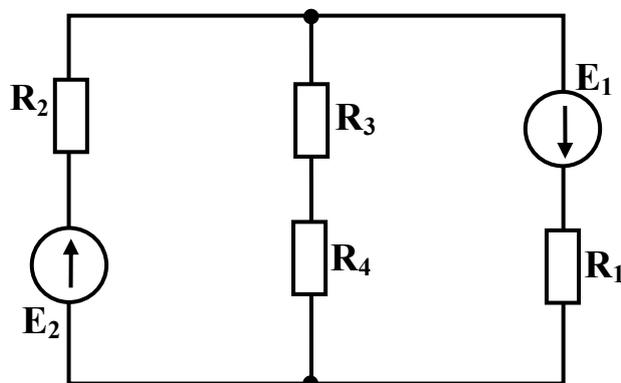
Мощность, расходуемая приемниками электрической энергии:

$$P_{\text{пр}} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 = 20 \times 4,75^2 + 40 \times 3^2 + 20 \times 1,75^2 = 451,25 + 360 + 61,25 = 872,5 \text{ Вт}$$

## 2.3 Задачи для самостоятельного решения

### ЗАДАЧА 1

Составить систему уравнений, необходимых для определения токов по первому и второму законам Кирхгофа, найти токи во всех ветвях электрической цепи методом контурных токов и методом напряжения между двумя узлами, составить баланс мощностей, если  $E_1 = 110 \text{ В}$ ,  $E_2 = 80 \text{ В}$ ,  $R_1 = 4 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 1 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 6 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 5 \text{ Ом}$ .



## 3. ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

### 3.1 Основные теоретические положения

В настоящее время практически вся промышленность, бытовые приборы, электрические лампы питаются переменным током.

Переменным током называется ток, который с течением времени изменяется по величине и направлению. Из всех возможных форм переменных токов наибольшее распространение получил синусоидальный ток т.е. ток

который периодически изменяется во времени по синусоидальному закону  $i = I_m \sin(\omega t \pm \psi_i)$ .

Синусоидальные ЭДС, ток и напряжение характеризуются мгновенным, амплитудным, действующим значениями.

Значения переменных величин ЭДС, тока, напряжения в любой момент времени  $t$  называют мгновенными значениями и обозначают строчными буквами  $e, i, u$ .

Наибольшие значения мгновенных величин за период называют амплитудами:  $E_m$  – амплитуда ЭДС,  $I_m$  – амплитуда тока,  $U_m$  – амплитуда напряжения.

Промежуток времени  $T$ , в течении которого ЭДС (ток) совершает полное колебание и принимает прежнее по величине и знаку значение, называется периодом.

Число периодов в секунду – частота переменного тока:

$$f = \frac{1}{T} \quad (21)$$

Стандартной частотой промышленного переменного тока в Белоруссии и Европе является частота 50 Гц, в США и Японии – 60 Гц.

При расчете цепей переменного тока чаще всего пользуются понятием действующего значения тока, напряжения, ЭДС. Действующие значения обозначаются прописными буквами, т.е.  $E$  – ЭДС,  $I$  – ток,  $U$  – напряжение. На шкалах измерительных приборов, а также в технической документации, если нет оговорок, указываются действующие значения тока, напряжения ЭДС.

Действующее значение ЭДС, напряжения, тока в  $\sqrt{2}$  раз меньше амплитудного значения:

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \quad (22)$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad (23)$$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (24)$$

Рассмотрим электрическую цепь синусоидального тока с последовательным соединением резистора, катушки индуктивности и конденсатора.

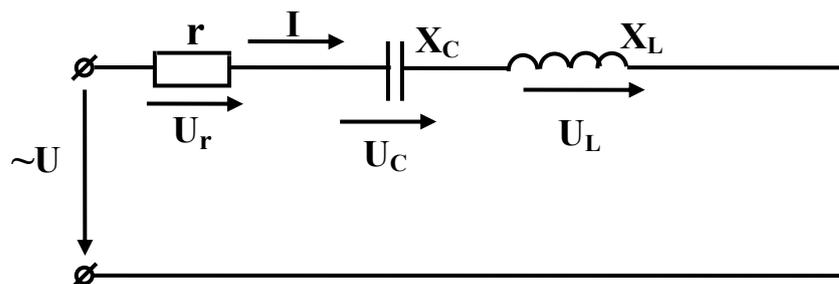


Рисунок 7 – Электрическая цепь с последовательным соединением  $r, L, C$

При подключении данной цепи (рисунок 7) к источнику электрической энергии под действием приложенного синусоидального напряжения в цепи будет протекать синусоидальный ток.

Ток в цепи определяется по закону Ома:

$$I = \frac{U}{Z} \quad (25)$$

Полное сопротивление цепи при последовательном соединении равно:

$$Z = \sqrt{r^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (26)$$

Напряжение на зажимах источника:

$$U = \sqrt{U_r^2 + (U_L - U_C)^2} \quad (27)$$

Электрическая цепь синусоидального тока с последовательным соединением  $r$ ,  $L$ ,  $C$ , потребляет активную и реактивную мощность.

Активная мощность:

$$P = U_r I = I^2 r = UI \cos \varphi \quad (28)$$

Реактивная мощность:

$$Q = Q_L - Q_C = (U_L - U_C) I = I^2 (X_L - X_C) = UI \sin \varphi \quad (29)$$

Полная мощность:

$$S = U I = I^2 Z = \sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2} \quad (30)$$

Коэффициент мощности  $\cos \varphi$ :

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{r}{Z} \quad (31)$$

В цепи с последовательным соединением  $r$ ,  $L$  и  $C$  при равенстве реактивных сопротивлений ( $X_L = X_C$ ) наступает резонанс напряжений. Резонанс напряжений может быть получен путем изменения индуктивности, емкости или частоты переменного тока.

Частота собственных колебаний колебательного контура определяется следующим выражением:

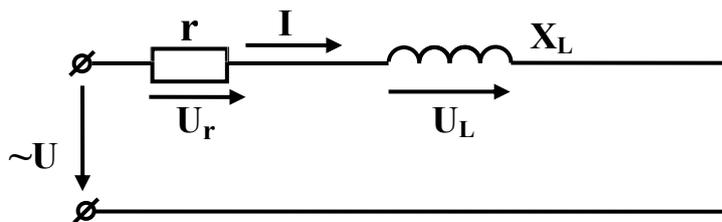
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (32)$$

Явление резонанса напряжений широко используется в радиотехнике, измерительной технике, телеуправлении.

## 3.2 Типовые задачи с решениями

### ЗАДАЧА 1

Катушка, имеет активное сопротивление 40 Ом и индуктивное 30 Ом, включена на напряжение 380 В, определить ток, активное и индуктивное напряжение, активную, реактивную и полную мощность.  $f = 50$  Гц.



Полное сопротивление цепи:

$$Z = \sqrt{r^2 + X_L^2} = \sqrt{40^2 + 30^2} = 50 \text{ Ом}$$

Ток, протекающий в катушке, определим по закону Ома:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{380}{50} = 7,6 \text{ А}$$

Активное и индуктивное напряжение:

$$U_r = r I = 40 \times 7,6 = 304 \text{ В}$$

$$U_L = X_L I = 30 \times 7,6 = 228 \text{ В}$$

Активная, реактивная и полная мощность:

$$P = U_r I = 304 \times 7,6 = 2310 \text{ Вт}$$

$$Q = Q_L = U_L I = 228 \times 7,6 = 1733 \text{ вар}$$

$$S = U I = 380 \times 7,6 = 2888 \text{ В} \cdot \text{А}$$

Индуктивность катушки:

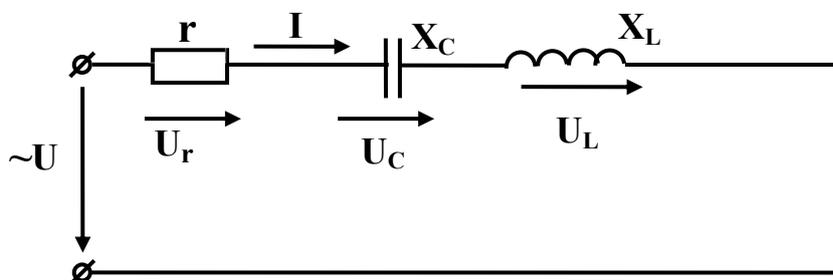
$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{30}{2 \times 3,14 \times 50} = 0,096 \text{ Гн}$$

Коэффициент мощности  $\cos \varphi$ :

$$\cos \varphi = \frac{r}{Z} = \frac{40}{50} = 0,8$$

## ЗАДАЧА 2

Определить ток в цепи, напряжение на элементах, активную, реактивную, полную мощность, индуктивность катушки, емкость конденсатора, коэффициент мощности  $\cos \varphi$ , если  $r = 8 \text{ Ом}$ ,  $X_L = 10 \text{ Ом}$ ,  $X_C = 4 \text{ Ом}$ ,  $U = 100 \text{ В}$ ,  $f = 50 \text{ Гц}$ . Построить векторную диаграмму.



Полное сопротивление цепи:

$$Z = \sqrt{r^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{8^2 + (10 - 4)^2} = 10 \text{ Ом}$$

Ток, протекающий в цепи, определим по закону Ома:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{100}{10} = 10 \text{ A}$$

Напряжения на элементах:

$$U_r = r I = 8 \times 10 = 80 \text{ B}$$

$$U_L = X_L I = 10 \times 10 = 100 \text{ B}$$

$$U_C = X_C I = 4 \times 10 = 40 \text{ B}$$

Активная, реактивная и полная мощность:

$$P = I^2 r = 10^2 \times 8 = 800 \text{ Вт}$$

$$Q = Q_L - Q_C = I^2 (X_L - X_C) = 10^2 \times (10 - 4) = 600 \text{ вар}$$

$$S = I^2 Z = 10^2 \times 10 = 1000 \text{ В} \cdot \text{А}$$

Индуктивность катушки и емкость конденсатора:

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{10}{314} = 0,032 \text{ Гн}$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2 \times 3,14 \times 50 \times 4} \times 10^6 = 796 \text{ мкФ}$$

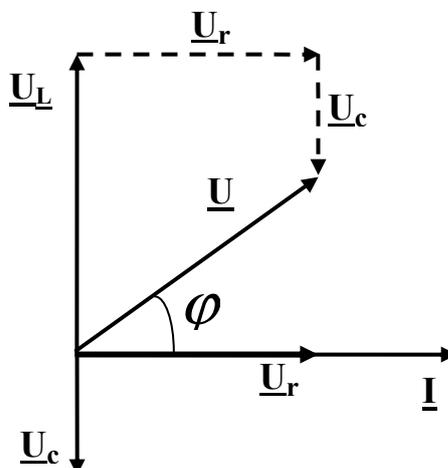
Коэффициент мощности  $\cos \varphi$ :

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{800}{1000} = 0,8$$

Выберем масштаб построения векторной диаграммы  $m_I = 2 \frac{\text{А}}{\text{см}}$ ,  $m_U = 25 \frac{\text{В}}{\text{см}}$ .

Построение начинаем с вектора тока, относительно него откладываем вектора напряжений. Вектор активного напряжения будет совпадать по фазе с вектором тока, вектор индуктивного напряжения будет опережать вектор тока на  $90^\circ$ , вектор емкостного напряжения будет отставать от вектора тока на  $90^\circ$ .

Для определения длины векторов их величина делится на масштаб ( $\ell_{U_r} = \frac{U_r}{m_U} = \frac{80}{25} = 3,2 \text{ см}$ ,  $\ell_{U_L} = \frac{U_L}{m_U} = \frac{100}{25} = 4 \text{ см}$ ,  $\ell_{U_C} = \frac{U_C}{m_U} = \frac{40}{25} = 1,6 \text{ см}$ ).



### 3.3 Задачи для самостоятельного решения

#### ЗАДАЧА 1

Батарея конденсаторов емкостью  $C = 50$  мкФ соединена последовательно с реостатом сопротивлением  $r = 29,1$  Ом. Определить напряжение на батарее конденсаторов и реостате, ток в цепи, активную, реактивную и полную мощность, коэффициент мощности, если приложенное напряжение  $U=220$  В и частота тока  $f = 50$  Гц.

#### ЗАДАЧА 2

К катушке, индуктивность которой  $L = 0,1$  Гн и сопротивление  $r_k = 15$  Ом, приложено напряжение переменного тока  $U_m = 141$  В, частотой 50 Гц. Определить действующее значение тока в цепи и построить векторную диаграмму.

#### ЗАДАЧА 3

В сеть напряжением  $U=127$  В и частотой 50 Гц включены последовательно конденсатор емкостью 290 мкФ, катушка с индуктивностью  $L = 0,1$  Гн и резистор с сопротивлением 5 Ом. Определить ток, активную, реактивную и полную мощности цепи. Построить векторную диаграмму.

## 4. ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

### 4.1 Основные теоретические положения

В электрических цепях переменного тока имеются цепи с параллельным соединением приемников электроэнергии, при котором все приемники находятся под одним и тем же напряжением.

Для анализа и расчета разветвленных цепей переменного тока используют проводимости, с помощью которых разветвленную цепь можно преобразовать в простейшую цепь, и аналитически рассчитать токи и напряжения всех ее участков. В цепях переменного тока существуют три проводимости – полная, активная и реактивная.

Рассмотрим электрическую цепь с параллельным соединением  $r$ ,  $L$ ,  $C$  (рисунок 8).

Активная проводимость участка цепи с резистором:

$$g = \frac{r}{Z^2} \quad (33)$$

Реактивная проводимость участка цепи с индуктивным элементом:

$$b_L = \frac{1}{X_L} \quad (34)$$

Реактивная проводимость участка цепи с емкостным элементом:

$$b_C = \frac{1}{X_C} \quad (35)$$

Полная проводимость цепи:

$$Y = \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2} \quad (36)$$

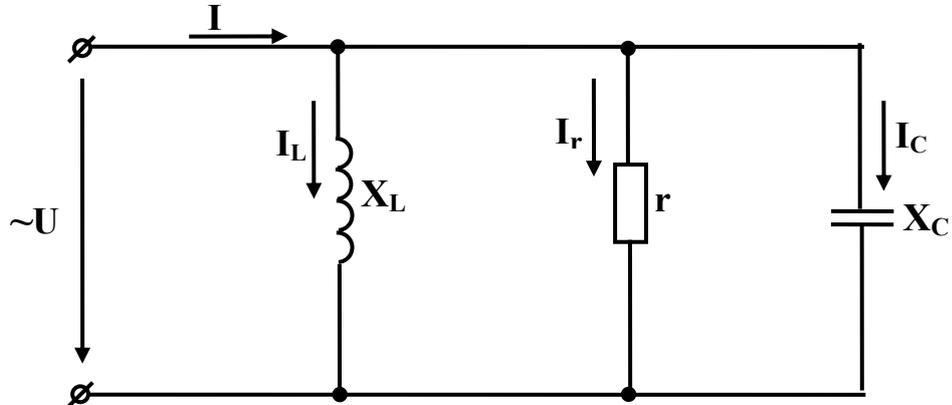


Рисунок 8 – Электрическая цепь с параллельным соединением  $r$ ,  $L$ ,  $C$

Токи в параллельных ветвях можно определить по закону Ома:

$$I_r = \frac{U}{r} = Ug \quad (37)$$

$$I_C = \frac{U}{X_C} = Ub_C \quad (38)$$

$$I_L = \frac{U}{X_L} = Ub_L \quad (39)$$

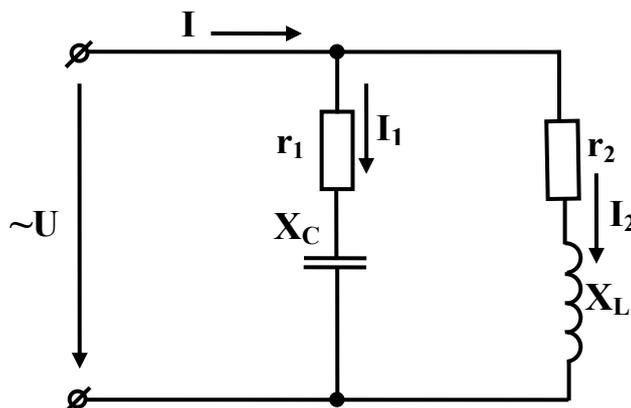
Общий ток, в неразветвленной части цепи:

$$I = YU = \sqrt{I_r^2 + (I_L - I_C)^2} \quad (40)$$

## 4.2 Типовые задачи с решениями

### ЗАДАЧА 1

Определить токи во всех ветвях электрической цепи, активную реактивную и полную мощность, если  $r_1 = 3$  Ом,  $L = 12,74$  мГн,  $r_2 = 8$  Ом,  $C = 530$  мкФ,  $f = 50$  Гц. Напряжение на зажимах цепи  $U = 220$  В.



Решим задачу несколькими методами.

### Метод проводимостей

Реактивные сопротивления:

$$X_L = 2\pi fL = 2 \times 3,14 \times 50 \times 12,74 \times 10^{-3} = 4 \text{ Ом}$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2 \times 3,14 \times 50 \times 530} \times 10^6 = 6 \text{ Ом}$$

Полные сопротивления параллельных ветвей:

$$Z_1 = \sqrt{r_1^2 + X_L^2} = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \text{ Ом}$$

$$Z_2 = \sqrt{r_2^2 + X_C^2} = \sqrt{8^2 + 6^2} = 10 \text{ Ом}$$

Активная проводимость параллельных ветвей:

$$g_1 = \frac{r_1}{Z_1^2} = \frac{3}{25} = 0,12 \text{ См}$$

$$g_2 = \frac{r_2}{Z_2^2} = \frac{8}{100} = 0,08 \text{ См}$$

Реактивная проводимость катушки и конденсатора:

$$b_L = \frac{X_L}{Z_1^2} = \frac{4}{25} = 0,16 \text{ См}$$

$$b_C = \frac{X_C}{Z_2^2} = \frac{6}{100} = 0,06 \text{ См}$$

Полная проводимость первой и второй ветви цепи:

$$Y_1 = \sqrt{g_1^2 + b_L^2} = \sqrt{0,12^2 + 0,16^2} = 0,2 \text{ См}$$

$$Y_2 = \sqrt{g_2^2 + b_C^2} = \sqrt{0,08^2 + 0,06^2} = 0,1 \text{ См}$$

Полная проводимость всей цепи:

$$Y = \sqrt{(g_1 + g_2)^2 + (b_L - b_C)^2} = \sqrt{(0,12 + 0,08)^2 + (0,16 - 0,06)^2} = 0,2236 \text{ См}$$

Токи параллельных ветвей:

$$I_1 = UY_1 = 220 \times 0,2 = 44 \text{ А}$$

$$I_2 = UY_2 = 220 \times 0,1 = 22 \text{ А}$$

Общий ток в неразветвленной части цепи:

$$I = UY = 220 \times 0,2236 = 49,2 \text{ А}$$

Активная мощность параллельных ветвей:

$$P_1 = U^2 g_1 = 220^2 \times 0,12 = 5808 \text{ Вт}$$

$$P_2 = U^2 g_2 = 220^2 \times 0,08 = 3872 \text{ Вт}$$

Активная мощность всей цепи:

$$P = P_1 + P_2 = 5808 + 3872 = 9680 \text{ Вт}$$

Реактивная мощность параллельных ветвей:

$$Q_L = U^2 b_L = 220^2 \times 0,16 = 7744 \text{ вар}$$

$$Q_C = U^2 b_C = 220^2 \times 0,06 = 2904 \text{ вар}$$

Реактивная мощность всей цепи:

$$Q = U^2 b = U^2 (b_L - b_C) = 220^2 \times (0,16 - 0,06) = 4840 \text{ вар}$$

Полная мощность всей цепи:

$$S = U^2 Y = 220^2 \times 0,2236 = 10822,2 \text{ В} \cdot \text{А}$$

### Аналитический метод

При решении задачи аналитическим методом необходимо представить токи в ветвях через активные и реактивные составляющие.

Определим углы сдвига фаз между токами и напряжениями в параллельных ветвях:

$$\varphi_1 = \arctg \frac{X_L}{r_1} = \arctg \frac{4}{3} = 53^\circ$$

$$\varphi_2 = \arctg \frac{X_C}{r_2} = \arctg \frac{6}{8} = 37^\circ$$

Активные составляющие токов параллельных ветвей:

$$I_{a1} = I_1 \cos \varphi_1 = 44 \times \cos 53^\circ = 44 \times 0,6 = 26,4 \text{ А}$$

$$I_{a2} = I_2 \cos \varphi_2 = 22 \times \cos 37^\circ = 22 \times 0,8 = 17,6 \text{ А}$$

Реактивные составляющие токов параллельных ветвей:

$$I_{p1} = I_L = I_1 \sin \varphi_1 = 44 \times \sin 53^\circ = 44 \times 0,8 = 35,2 \text{ А}$$

$$I_{p2} = I_C = I_2 \sin \varphi_2 = 22 \times \sin 37^\circ = 22 \times 0,6 = 13,2 \text{ А}$$

Активный ток всей цепи:

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} = 26,4 + 17,6 = 44 \text{ А}$$

Реактивный ток всей цепи:

$$I_p = I_L - I_C = 35,2 - 13,2 = 22 \text{ А}$$

Общий ток в неразветвленной части цепи:

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{44^2 + 22^2} = 49,2 \text{ А}$$

## 4.3 Задачи для самостоятельного решения

### ЗАДАЧА 1

В сеть напряжением  $U=127 \text{ В}$  и частотой  $50 \text{ Гц}$  включены параллельно конденсатор емкостью  $290 \text{ мкФ}$ , резистор с сопротивлением  $10 \text{ Ом}$  и катушка с индуктивностью  $0,1 \text{ Гн}$ . Определить общий ток. Построить векторную диаграмму.

### ЗАДАЧА 2

Напряжение на зажимах сопротивления  $r=3,63 \text{ Ом}$  и индуктивности  $L=0,02 \text{ Гн}$ , соединенных параллельно, равно  $u=\sqrt{2} 120 \sin \omega t \text{ В}$ . Вычислить полную проводимость цепи и действующие значения токов в резисторе и катушке. Построить векторную диаграмму.  $f=50 \text{ Гц}$ .

### ЗАДАЧА 3

Напряжение на зажимах сопротивления  $r = 10$  Ом и емкости  $C = 100$  мкФ, соединенных параллельно, равно  $u = \sqrt{2} 100 \sin \omega t$  В. Вычислить полную проводимость цепи и действующие значения токов в  $r$  и  $C$ . Построить векторную диаграмму.  $f = 50$  Гц.

## 5 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

### 5.1 Основные теоретические положения

Трехфазная цепь состоит из трех основных частей: трехфазного генератора, линии передачи со всем необходимым оборудованием и приемников энергии, которые могут быть как трехфазными (например, электродвигатели), так и однофазными (например, лампы накаливания).

Нагрузка называется симметричной, если к каждой фазе генератора подключены приемники, имеющие равные по величине и одинаковые по характеру сопротивления.

Источники энергии и приемники энергии трехфазной системы могут быть соединены звездой или треугольником.

При соединении звездой однофазных приемников: их концы соединяются в один общий узел  $n$ , называемый нулевой или нейтральной точкой приемников.

Начала фаз источника с началом фаз приемника соединяются линейными проводами. В некоторых случаях нейтральную точку генератора  $N$  и нейтральную точку приемника  $n$  соединяют между собой четвертым проводом – нейтральным или нулевым. Такое соединение называется соединением звездой с нулевым проводом, трехфазная система в этом случае является четырехпроводной.

В трехфазных электрических цепях различают фазные и линейные напряжения и токи.

При соединении фаз трехфазного источника звездой:

$$U_{\text{лин}} = \sqrt{3} U_{\phi} \quad (41)$$

Это выражение справедливо для напряжения на зажимах приемника, при условии, что нагрузка симметрична или при несимметричной нагрузке с нейтральным проводом.

При соединении звездой линейные токи равны соответствующим фазным токам:

$$I_{\text{лин}} = I_{\phi} \quad (42)$$

Ток в нейтральном проводе в соответствии с первым законом Кирхгофа равен:

$$\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C = \bar{I}_N \quad (43)$$

Несимметричную нагрузку, при соединении звездой, нельзя подключать в трехфазную сеть без нейтрального провода. Нейтральный провод обеспечивает симметрию фазных напряжений приемника при несимметричной нагрузке.

При соединении приемников треугольником конец одной фазы соединяется с началом второй, конец второй с началом третьей, конец третьей с началом первой.

Каждая фаза приемника при соединении треугольником подключена к двум линейным проводам, поэтому независимо от величины и характера сопротивлений приемника каждое фазное напряжение равно соответствующему линейному напряжению:

$$U_{\text{лин}} = U_{\phi} \quad (44)$$

При соединении треугольником линейные токи в  $\sqrt{3}$  раз больше фазных токов, если нагрузка симметричная:

$$I_{\text{лин}} = \sqrt{3} I_{\phi} \quad (45)$$

Если нагрузка несимметричная, фазные токи  $I_{ab}$ ,  $I_{bc}$ ,  $I_{ca}$  не равны линейным токам  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ . Применяя первый закон Кирхгофа к узловым точкам a, b и c, можно определить линейные токи.

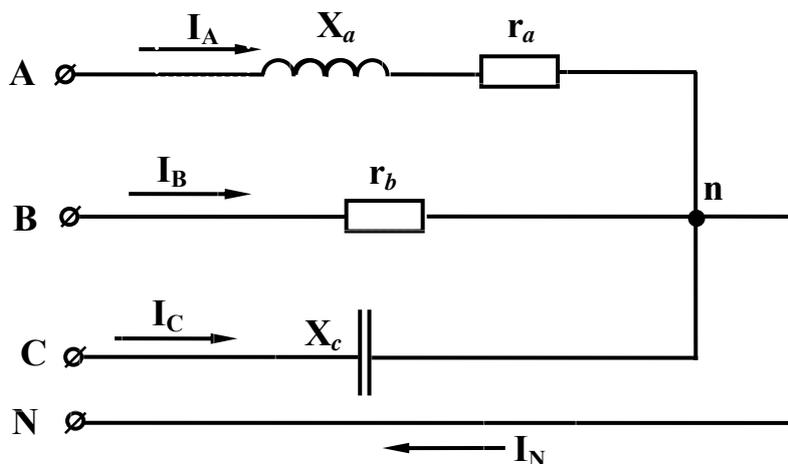
В трехфазной цепи фазные токи определяются по закону Ома через соответствующие фазные напряжения и сопротивления фаз:

$$I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\phi}} \quad (46)$$

## 5.2 Типовые задачи с решениями

### ЗАДАЧА 1

Определить фазные и линейные токи, ток в нейтральном проводе, если  $r_a=8$  Ом,  $X_a=6$  Ом,  $X_b=12,7$  Ом,  $r_c=12,7$  Ом, линейное напряжение 220 В. Построить векторную диаграмму токов и напряжений.



Фазные напряжения:

$$U_A = U_B = U_C = \frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ В}$$

Общие сопротивления фаз:

$$Z_a = \sqrt{r_a^2 + X_a^2} = \sqrt{8^2 + 6^2} = 10 \text{ Ом}$$

$$Z_b = \sqrt{r_b^2 + X_b^2} = r_b = 12,7 \text{ Ом т.к. } X_b = 0$$

$$Z_c = \sqrt{r_c^2 + X_c^2} = X_c = 12,7 \text{ Ом т.к. } r_c = 0$$

Определим фазные (линейные) токи  $I_\phi = I_L$ :

$$I_A = \frac{U_A}{Z_a} = \frac{127}{10} = 12,7 \text{ А}$$

$$I_B = \frac{U_B}{Z_b} = \frac{127}{12,7} = 10 \text{ А}$$

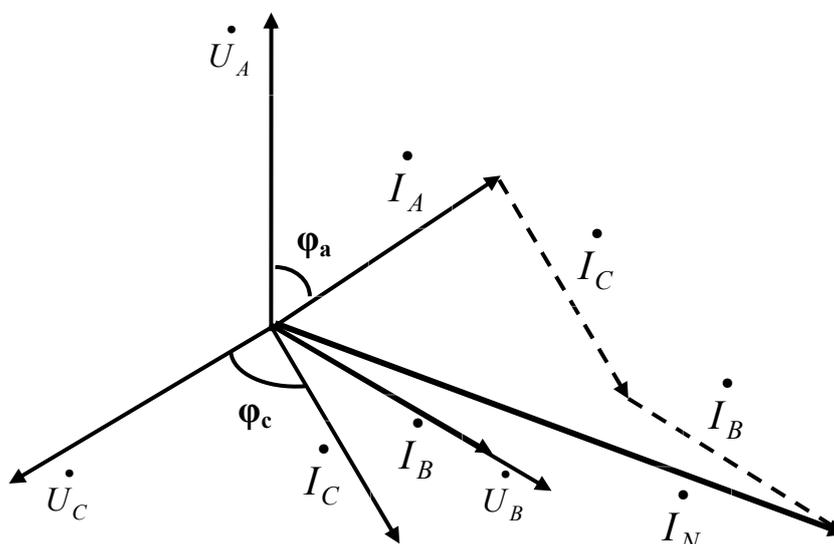
$$I_C = \frac{U_C}{Z_c} = \frac{127}{12,7} = 12,7 \text{ А}$$

Определим сдвиг фаз между фазными токами и фазными напряжениями:

$$\varphi_a = \arctg \frac{X_a}{r_a} = \arctg \frac{8}{6} = 53^\circ$$

$$\varphi_b = \arctg \frac{X_b}{r_b} = \arctg \frac{0}{12,7} = \arctg 0 = 0^\circ$$

$$\varphi_c = \arctg \frac{X_c}{r_c} = \arctg \frac{12,7}{0} = \arctg \infty = 90^\circ$$



Масштаб для построения векторной диаграммы:  $m_U = 30 \frac{\text{В}}{\text{см}}$ ,  $m_I = 3,5 \frac{\text{А}}{\text{см}}$ .

Векторная диаграмма строится следующим образом: откладываем вектора фазных напряжений, они сдвинуты друг относительно друга на  $120^\circ$ . Относительно каждого фазного напряжения отложим соответствующий ему

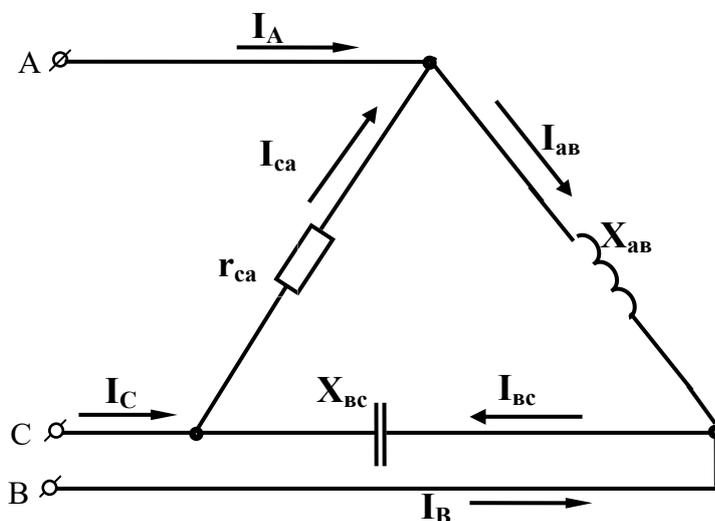
фазный ток. Ток  $\dot{I}_A$  отстает от напряжения  $\dot{U}_A$  на  $\varphi_a=53^\circ$  т.к. нагрузка активно-индуктивная, ток  $\dot{I}_B$  совпадает по фазе с напряжением  $\dot{U}_B$  т.к. нагрузка активная, ток  $\dot{I}_C$  опережает напряжение  $\dot{U}_C$  на  $\varphi_c=90^\circ$ , т.к. нагрузка емкостная.

Ток в нейтральном проводе определяется по векторной диаграмме, как сумма векторов фазных токов  $\dot{I}_N \doteq \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$ .

$$I_N = \ell_{I_N} \times m_U = 8 \text{ см} \times 3,5 \frac{\text{А}}{\text{см}} = 28 \text{ А}$$

## ЗАДАЧА 2

Определить фазные и линейные токи в трехфазной цепи с линейным напряжением 220 В, если  $X_{ab} = r_{ca} = X_{bc} = 10 \text{ Ом}$ .



Приемники соединены по схеме треугольник, поэтому  $U_{л} = U_{\phi}$   
 Рассчитаем полные сопротивления каждой фазы цепи:

$$Z_{ab} = \sqrt{r_{ab}^2 + X_{ab}^2} = X_{ab} = 10 \text{ Ом}$$

$$\varphi_{ab} = \arctg \frac{X_{ab}}{r_{ab}} = \arctg \frac{10}{0} = 90^\circ$$

$$Z_{bc} = \sqrt{r_{bc}^2 + X_{bc}^2} = r_{bc} = 10 \text{ Ом}$$

$$\varphi_{bc} = \arctg \frac{X_{bc}}{r_{bc}} = \arctg \frac{0}{10} = 0^\circ$$

$$Z_{ca} = \sqrt{r_{ca}^2 + X_{ca}^2} = X_{ca} = 10 \text{ Ом}$$

$$\varphi_{ca} = \arctg \frac{X_{ca}}{r_{ca}} = \arctg \frac{10}{0} = 90^\circ$$

Рассчитаем фазные токи:

$$I_{ab} = \frac{U_{AB}}{Z_{ab}} = \frac{220}{10} = 22 \text{ А}$$

$$I_{bc} = \frac{U_{BC}}{Z_{bc}} = \frac{220}{10} = 22 \text{ A}$$

$$I_{ca} = \frac{U_{CA}}{Z_{ca}} = \frac{220}{10} = 22 \text{ A}$$

### 5.3 Задачи для самостоятельного решения

#### ЗАДАЧА 1

В четырехпроводную трехфазную сеть включена несимметричная активная нагрузка, имеющая значения сопротивлений в фазах А, В и С соответственно 20 Ом, 40 Ом и 10 Ом. Определить токи в фазах, потребляемую мощность нагрузки и ток в нейтральном проводе, если действующее значение линейного напряжения  $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$ .

#### ЗАДАЧА 2

Приемники электрической энергии, соединенные по схеме треугольник, подключены к трехфазной сети с действующим значением линейного напряжениями  $U_{\text{л}} = 220 \text{ В}$  при частоте  $f = 50 \text{ Гц}$ . В фазу АВ включен конденсатор емкостью  $C = 116 \text{ мкФ}$ , в фазу ВС – резистор сопротивлением  $r = 27,5 \text{ Ом}$ , в фазу СА – катушка с индуктивностью  $L = 87,5 \text{ мГн}$ . Определить действующие значения фазных и линейных токов. Построить векторную диаграмму токов и напряжений.

#### ЗАДАЧА 3

Каждая обмотка трехфазного двигателя рассчитана на напряжение 220 В. Какое должно быть линейное напряжение трехфазной сети, в которую можно включить двигатель?

## 6 АСИНХРОННЫЕ ТРЕХФАЗНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

### 6.1 Основные теоретические положения

Асинхронные машины – наиболее распространенные электрические машины. Чаще всего они используются как электродвигатели и являются основными преобразователями электрической энергии в механическую энергию. В настоящее время асинхронные трехфазные электродвигатели широко применяются в качестве электропривода производственных машин на предприятиях пищевой промышленности.

При подаче к трехфазной обмотке статора асинхронного двигателя трехфазного напряжения в ней возникает трехфазный переменный ток, который создает вращающееся магнитное поле.

Частота вращения магнитного поля асинхронной машины:

$$n_0 = \frac{60 f_1}{p}, \quad (47)$$

где  $f_1$  – частота тока сети;

$p$  – число пар магнитных полюсов двигателя.

Одним из важнейших показателей, характеризующих работу асинхронного двигателя, является скольжение ротора под которым понимается отношение:

$$S = \frac{n_0 - n_1}{n_0} 100\% \quad (48)$$

Критическое скольжение – это скольжение, при котором асинхронный двигатель развивает максимальный вращающий момент:

$$S_{кр} = S_H (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}), \quad (49)$$

где  $\lambda$  – коэффициент перегрузок;

$S_H$  – скольжение при номинальной нагрузке.

Частота вращения ротора двигателя выражается через скольжение:

$$n_1 = n_0 (1 - S) \quad (50)$$

Момент, развиваемый двигателем при номинальной нагрузке, называется номинальным:

$$M_H = 9550 \frac{P_H}{n_H} \quad (51)$$

Двигатель начинает работать со скольжения равного единице. Момент, который он при этом развивает, называется пусковым.

Момент, характеризующий перегрузочную способность двигателя, называется максимальным или критическим

## 6.2 Типовые задачи с решениями

### ЗАДАЧА 1

Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором имеет следующие данные при номинальном режиме работы: мощность на валу 5,52 кВт, напряжение 220/380 В, частота вращения 1420 об/мин, коэффициент мощности 0,7 и  $\eta_n = 0,78$ .

Определить мощность, потребляемую двигателем из сети, токи в цепи статора при соединении обмотки статора треугольником и звездой, вращающий момент на валу и скольжение ротора при номинальном режиме работы.

Мощность на входе электродвигателя при номинальном режиме работы:

$$P_{1H} = \frac{P_{2H}}{\eta_n} = \frac{5,52}{0,78} = 7,08 \text{ кВт}$$

Ток в цепи статора электродвигателя:

при схеме соединения треугольником

$$I_{\Delta H} = \frac{P_{1H}}{\sqrt{3} U_{\Delta H} \cos \varphi_H} = \frac{7080}{\sqrt{3} \times 220 \times 0,7} = 26,6 \text{ А}$$

при схеме соединения звездой

$$I_{YH} = \frac{P_{1H}}{\sqrt{3} U_{YH} \cos \varphi_H} = \frac{7080}{\sqrt{3} \times 380 \times 0,7} = 15,4 \text{ А}$$

Вращающий момент на валу:

$$M_H = 9550 \frac{P_{2H}}{n_H} = \frac{9550 \times 5,52}{1420} = 37,1 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Номинальное скольжение ротора:

$$S_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0} = \frac{1500 - 1420}{1500} = 0,053,$$

где  $n_0$  – ближайшая большая относительно  $n_H$  синхронная частота вращения.

### ЗАДАЧА 2

Номинальная мощность трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором  $P_{2H}=10$  кВт, номинальное напряжение  $U_H=380$  В, номинальное скольжение  $S_H=0,053$ , номинальный КПД  $\eta_H=0,84$ , номинальный коэффициент мощности  $\cos\varphi_H=0,85$ , число пар полюсов  $p=2$ , кратность пускового момента  $K_{пуск}=1,8$ , пускового тока  $K_I=7$ , перегрузочная способность  $\lambda=2,2$ .

Определить: полные потери в двигателе при номинальной нагрузке, номинальный и пусковой токи, номинальный, пусковой и максимальный вращающие моменты. Как изменится пусковой момент двигателя при снижении напряжения на его зажимах на 10% и возможен ли пуск двигателя при этих условиях с номинальной нагрузкой?

Потребляемая мощность:

$$P_{1H} = \frac{P_{2H}}{\eta_H} = \frac{10}{0,84} = 11,9 \text{ кВт}$$

Полные потери в двигателе при номинальной нагрузке:

$$\Delta P_H = P_{1H} - P_{2H} = 11,9 - 10 = 1,9 \text{ кВт}.$$

Номинальный и пусковой токи:

$$I_H = \frac{P_{1H}}{\sqrt{3}U_H \cos\varphi_H} = \frac{11,9 \times 1000}{1,73 \times 380 \times 0,85} = 21,3 \text{ А}$$

$$I_{пуск} = K_I I_{ном} = 7 \times 21,3 = 149,1 \text{ А}, \quad K_I = \frac{I_{пуск}}{I_{ном}}$$

Частота вращения магнитного поля статора:

$$n_0 = \frac{60f_1}{p} = \frac{60 \times 50}{2} = 1500 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$$

Номинальная частота вращения ротора двигателя:

$$n_H = n_0(1 - S_H) = 1500 \times (1 - 0,053) = 1420 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$$

Номинальный, пусковой и максимальный моменты двигателя:

$$M_H = 9550 \frac{P_{2H}}{n_H} = \frac{9550 \times 10}{1420} = 67,3 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$M_{\max} = \lambda \cdot M_H = 2,2 \times 67,3 = 148,1 \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad \lambda = \frac{M_{\max}}{M_{ном}}$$

$$M_{\text{пуск}} = K_{\text{пуск}} M_H = 1,8 \times 67,3 = 121,1 \text{ Н м}, K_{\text{пуск}} = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{ном}}}$$

Вращающий момент асинхронного электродвигателя пропорционален квадрату напряжения в сети. При понижении напряжения в сети на 10% оно составит 0,9 от номинального значения ( $0,9 \cdot U_H$ ), то вращающий момент составит  $(0,9)^2 = 0,81$  от номинального.

Пусковой вращающий момент при сниженном на 10% напряжении:

$$M_{\text{пуск}}^* = 0,81 M_{\text{пуск}} = 0,81 \times 121,1 = 98,1 \text{ Н м}$$

Пуск двигателя при номинальной нагрузке возможен при выполнении условия  $M_{\text{пуск}} \geq M_H$ .

$M_{\text{пуск}}^* = 98,1 \text{ Н м} > M_H = 67,3 \text{ Н м}$ , поэтому пуск двигателя возможен при номинальной нагрузке и сниженном на 10% напряжении.

### 6.3 Задачи для самостоятельного решения

#### ЗАДАЧА 1

Асинхронный трехфазный двигатель с короткозамкнутым ротором имеет следующие номинальные данные:  $P_H = 7,5 \text{ кВт}$ ,  $n_H = 2900 \text{ об/мин}$ , кратность пускового момента  $K_{\text{пуск}} = 1,8$ , способность к перегрузке  $\lambda = 2,2$ . Найти номинальный, максимальный и пусковой моменты, номинальное скольжение, частоту тока в роторе при частоте тока сети 50 Гц.

#### ЗАДАЧА 2.

Асинхронный трехфазный двигатель с короткозамкнутым ротором имеет следующие номинальные данные:  $P_H = 20 \text{ кВт}$ ,  $U_H = 380 \text{ В}$ ,  $\eta_H = 87,5\%$ ,  $\cos \varphi_H = 0,89$ ,  $K_I = 7$ , кратность пускового момента  $K_{\text{пуск}} = 1,3$ ,  $n_H = 2930 \text{ об/мин}$ . Определить пусковой момент и пусковой ток двигателя.

#### ЗАДАЧА 3

Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором включен в сеть на номинальное напряжение  $U_H = 220 \text{ В}$ , частотой  $f = 50 \text{ Гц}$ , имеет следующие данные: номинальную мощность  $P_H = 5,5 \text{ кВт}$ , число пар полюсов  $p = 1$ ,  $S_H = 3,0\%$ ,  $\eta_H = 0,86$ ,  $\cos \varphi_H = 0,89$ ,  $\lambda = 2,2$ ,  $K_{\text{пуск}} = 1,7$ ,  $K_I = 7$ . Определить: номинальный  $I_H$  и пусковой  $I_{\text{пуск}}$  токи, номинальный  $M_H$ , пусковой  $M_{\text{пуск}}$  и максимальный  $M_{\text{max}}$  моменты, полные потери в двигателе при номинальной нагрузке  $\Delta P_H$ . Как изменится пусковой момент двигателя при снижении напряжения на его зажимах на 15%, и возможен ли пуск двигателя при этих условиях с номинальной нагрузкой?

## 7 ЭЛЕКТРОПРИВОД

Электроприводом называется электромеханическая система, состоящая из электродвигательного, преобразовательного, передаточного и управляющего

устройств, предназначенных для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением.

Длительность работы и ее характер определяют режим работы электродвигателя. В соответствии с характером работы производственных механизмов установлены три основных номинальных режима двигателей: продолжительный ( $S_1$ ), кратковременный ( $S_2$ ), повторно-кратковременный ( $S_3$ ).

Продолжительный (длительный) режим – это режим работы такой длительности, при которой за время работы двигатель успевает нагреться до установившейся температуры  $\tau_y$ . В таком режиме работают: центробежные насосы, вентиляторы, компрессоры, конвейеры непрерывного транспорта.

Кратковременный режим – это такой режим работы, при котором за время работы  $t_p$  двигатель не успевает нагреться до установившейся температуры  $\tau_y$ , а за время паузы  $t_0$ , когда он отключен от сети, успевает охладиться до температуры окружающей среды  $\tau_{o.c.}$ . Такой режим характерен для самых различных механизмов кратковременного действия: шлюзов, разводных мостов, подъемных шасси самолетов.

Повторно-кратковременный режим – это такой режим работы, при котором за время работы  $t_p$  двигатель не успевает нагреться до установившейся температуры  $\tau_y$ , а за время паузы  $t_0$ , когда он отключен от сети, не успевает охладиться до температуры окружающей среды  $\tau_{o.c.}$ . В таком режиме работают: краны, лифты и другие подъемные механизмы.

Время цикла при повторно-кратковременном режиме не должно превышать десять минут. В противном случае режим работы станет продолжительным. Основной характеристикой этого режима является относительная продолжительность включения:

$$ПВ\% = \frac{t_p}{t_p + t_0} 100\% = \frac{t_p}{T_{цикла}} 100\%, \quad (52)$$

где  $T_{цикла}$  – время цикла.

Установлены следующие стандартные значения относительной продолжительности включения: 15%, 25%, 40%, 60% и 100%.

Так как электродвигатель является основным элементом любого электропривода, его выбор для нового электропривода или модернизации старого является одним из ответственных этапов проектирования. По электродвигателю выбирают аппараты пуска, защиты и регулирования электропривода.

Электродвигатель выбирается по требуемой мощности для приводимой им машины. Установка электродвигателя заниженной мощности недопустима, т.к. он будет перегреваться и выйдет из строя при сгорании изоляции обмотки статора, что приведет к простоям оборудования и к дополнительным расходам по замене двигателя.

Установка электродвигателя большей мощности, чем это необходимо, по условиям привода, вызывает излишние потери энергии при работе машины, обуславливает дополнительные капитальные затраты и увеличение габаритов двигателя.

Мощность электродвигателя для продолжительного режима работы с постоянной нагрузкой выбирают из условия

$$P_{ДВ} \geq P_{МХ}, \quad (53)$$

где  $P_{ДВ}$  – мощность электродвигателя, Вт;

$P_{МХ}$  – расчетная мощность механизма, Вт.

Мощность АД для привода вентилятора определяется по формуле

$$P = \frac{QHK}{102\eta_B\eta_n}, \quad (54)$$

где  $P$  – мощность двигателя, кВт;

$Q$  – производительность вентилятора, м<sup>3</sup>/с;

$H$  – давление создаваемое вентилятором, мм вод. ст.;

$K$  – коэффициент запаса;

$\eta_B$  – КПД вентилятора;

$\eta_n$  – КПД передачи от двигателя к вентилятору.

Мощность АД для привода горизонтального ленточного транспортера без промежуточных сбрасывателей может быть определена по формуле

$$P = \frac{QLK_{тр}}{367\eta_n}, \quad (55)$$

где  $P$  – мощность двигателя, кВт;

$Q$  – производительность транспортера, т/ч;

$L$  – рабочая длина транспортера, м;

$K_{тр}$  – коэффициент трения;

$\eta_n$  – КПД передачи от двигателя к транспортеру.

Мощность АД для транспортеров скребковых и винтовых (шнеков) определяется по формуле

$$P = \frac{QK_2}{367\eta_n}(K_C L_2 + H), \quad (56)$$

где  $P$  – мощность двигателя, кВт;

$Q$  – производительность транспортера, т/ч;

$L_2$  – расстояние перемещения груза, м;

$K_C$  – коэффициент сопротивления материала;

$\eta_n$  – КПД передачи от двигателя к транспортеру;

$K_2$  – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления при пуске транспортера;

$H$  – высота подъема груза, м.

Мощность АД для ковшового элеватора определяется по формуле

$$P = \frac{QH}{367\eta_n}, \quad (57)$$

где  $P$  – мощность двигателя, кВт;

$Q$  – производительность элеватора, т/ч;

$H$  – высота подъема груза, м;

$\eta_n$  – КПД передачи от двигателя к элеватору.

Мощность АД для подъемника определяется по формуле

$$P = \frac{(G + G_0)v}{102\eta_n\eta_n}, \quad (58)$$

где  $P$  – мощность двигателя, кВт;

$G$  – масса поднимаемого груза, кг;

$G_0$  – масса платформы для подъема груза, кг;

$\eta_n$  – КПД передачи от двигателя к подъемному механизму;

$v$  – скорость подъема груза, м/с;

$\eta_n$  – КПД подъемного механизма.

Мощность АД для привода вентилятора определяется по формуле

$$P = \frac{QHK}{102\eta_B\eta_n}, \quad (59)$$

где  $P$  – мощность двигателя, кВт;

$Q$  – производительность вентилятора, м<sup>3</sup>/с;

$H$  – давление создаваемое вентилятором, мм вод. ст.;

$K$  – коэффициент запаса;

$\eta_B$  – КПД вентилятора;

$\eta_n$  – КПД передачи от двигателя к вентилятору.

Мощность электродвигателя для режимов работы с переменной нагрузкой рассчитывают методом эквивалентных величин (момента, мощности):

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_i^2 t_i}{t_p}} \quad (60)$$

$$P_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i^2 t_i}{t_p}}, \quad (61)$$

где  $M_i, P_i$  – соответственно ток, момент, мощность двигателя на  $i$  – м

участке рабочего цикла;

$t_p$  – время работы двигателя.

## 3.2 Типовые задачи с решениями

### ЗАДАЧА 1

Определить мощность и выбрать двигатель по каталогу для привода подъемного механизма, работающего в повторно-кратковременном режиме. Проверить выбранный двигатель по перегрузочной способности и пусковому начальному моменту. Мощность на валу двигателя за цикл работы изменяется согласно нагрузочной диаграмме:  $P_1=10$  кВт,  $P_2=0$  кВт,  $P_3=8$  кВт,  $P_4=0$  кВт,  $P_5=5$  кВт,  $t_1=15$  с,  $t_2=25$  с,  $t_3=10$  с,  $t_4=35$  с,  $t_5=30$  с. По технологическим условиям следует использовать асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

Частота вращения подъемного механизма  $n=965$  об/мин. Помещение, где будет работать двигатель – влажное.

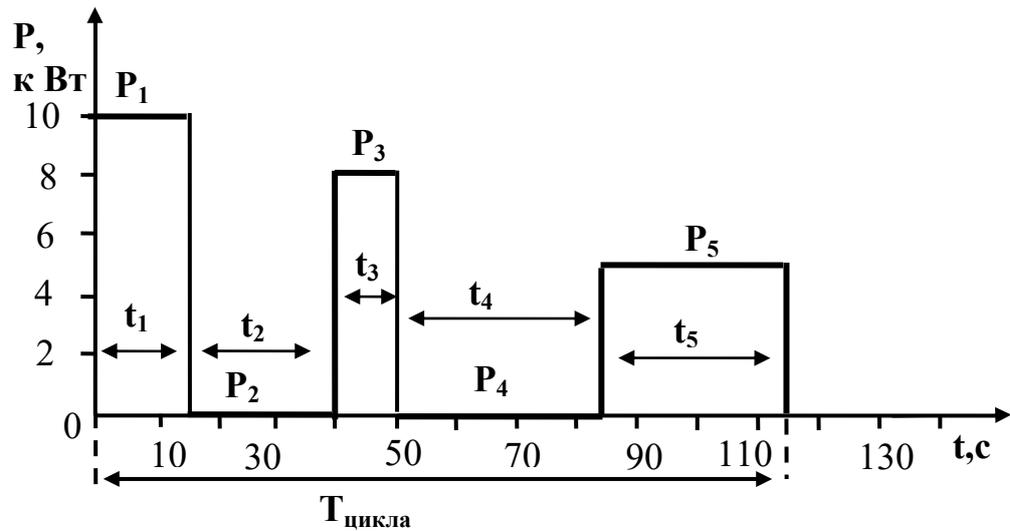


Рисунок 9 – Нагрузочная диаграмма  $P = f(t)$

Время цикла:

$$T_{цикла} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 = 15 + 25 + 10 + 35 + 30 = 115 \text{ с}$$

Время работы:

$$t_{раб} = t_1 + t_3 + t_5 = 15 + 10 + 30 = 55 \text{ с}$$

Рассчитаем мощность за рабочее время методом эквивалентной мощности:

$$P_{ЭКВ} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_3^2 t_3 + P_5^2 t_5}{t_1 + t_3 + t_5}} = \sqrt{\frac{10^2 \times 15 + 8^2 \times 10 + 5^2 \times 30}{15 + 10 + 30}} = 7,25 \text{ кВт}$$

Определим продолжительность включения двигателя:

$$ПВ_p = \frac{t_{раб}}{T_{цикла}} \times 100\% = \frac{55}{115} \times 100\% = 47,8\%$$

Стандартная продолжительность включения  $ПВ_{ст} = 60\%$

Поскольку рабочая продолжительность включения  $ПВ_p = 47,8\%$  отличается от стандартной, рассчитаем мощность двигателя с учетом стандартной продолжительности включения:

$$P_{дв.ст} = P_{ЭКВ} \sqrt{\frac{ПВ_p}{ПВ_{ст}}} = 7,25 \times \sqrt{\frac{47,8}{60}} = 6,5 \text{ кВт}$$

Для привода подъемного механизма выберем асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, согласно условию  $P_n \geq P_{дв.ст} \geq 6,5$  кВт, в закрытом исполнении т.к. помещение влажное серии 4А132М6У3. Каталожные данные выбранного двигателя:  $P_n = 7,5$  кВт,  $n_n = 970$  об/мин,  $\eta_n = 85,5\%$ ,  $\cos\phi_n = 0,81$ , кратность пускового момента  $K_{пуск} = 2,0$ , кратность пускового тока  $K_I = 6,5$ , коэффициент перегрузок  $\lambda = 2,5$ .

Проверим выбранный двигатель по перегрузочной способности и по условиям пуска.

Номинальный момент двигателя:

$$M_H = 9550 \frac{P_H}{n_H} = \frac{9550 \times 7,5}{970} = 73,8 \text{ Н м}$$

Максимальный (критический) момент:

$$M_{\max} = \lambda \cdot M_H = 2,5 \times 73,8 = 184,5 \text{ Н м}$$

Пусковой момент:

$$M_{\text{пуск}} = K_{\text{пуск}} M_H = 2,0 \times 73,8 = 147,6 \text{ Н м}$$

Максимальный статический момент (наибольший момент по нагрузочной диаграмме):

$$M_{\max.c} = 9550 \frac{P_1}{n} = 9550 \times \frac{10}{965} = 99 \text{ Н м}$$

По перегрузочной способности двигатель проходит, т. к. выполняется условие  $M_{\max.c} < 0,9 \cdot M_{\max}$  т.е.  $99 \text{ Н} \cdot \text{м} < 0,9 \times 184,5 = 166,1 \text{ Н} \cdot \text{м}$

Первый момент по нагрузочной диаграмме:

$$M_{1c} = 9550 \frac{P_1}{n} = 9550 \times \frac{10}{965} = 99 \text{ Н м}$$

Условие пуска двигателя под нагрузкой также выполняется  $M_{\text{п}} > M_{1c}$  т.е.  $147,6 \text{ Н} \cdot \text{м} > 99 \text{ Н} \cdot \text{м}$  ( $M_{1c}$  – первый момент по нагрузочной диаграмме).

Следовательно, двигатель для привода подъемного механизма выбран верно.

## ЗАДАЧА 2

Определить мощность и выбрать двигатель по каталогу для привода производственного механизма. Проверить выбранный двигатель по перегрузочной способности и пусковому начальному моменту. Момент на валу двигателя за цикл работы изменяется согласно нагрузочной диаграмме:  $M_1=100 \text{ Н м}$ ,  $M_2=50 \text{ Н м}$ ,  $M_3=90 \text{ Н м}$ ,  $t_1=1 \text{ с}$ ,  $t_2=3 \text{ с}$ ,  $t_3=4 \text{ с}$ ,  $T_{\text{цикл}}=8 \text{ с}$ . По технологическим условиям следует использовать асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, частота вращения производственного механизма  $n=1470 \text{ об/мин}$ . Помещение, где будет работать двигатель, – сухое, без пыли и грязи.

Определим эквивалентный момент за рабочее время:

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3}} = \sqrt{\frac{100^2 \cdot 1 + 50^2 \cdot 3 + 90^2 \cdot 4}{1 + 3 + 4}} = 78,98 \text{ Н м}$$

Эквивалентная мощность:

$$P_{\text{э}} = \frac{M_{\text{э}} n_n}{9550} = \frac{78,98 \times 1470}{9550} = 12,2 \text{ кВт}$$

Определим продолжительность включения двигателя:

$$ПВ_p = \frac{t_{\text{раб}}}{T_{\text{цикл}}} 100\% = \frac{8}{8} \times 100\% = 100\%$$

Продолжительность включения равна 100% – режим работы продолжительный.

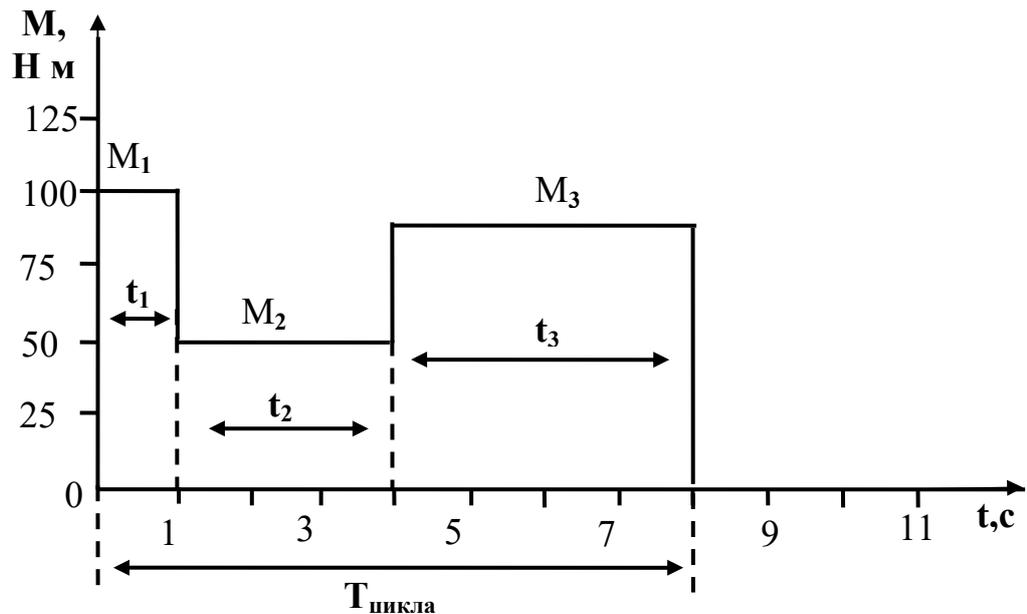


Рисунок 10 – Нагрузочная диаграмма  $M = f(t)$

По условиям работы выбираем по каталогу асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором ближайшей большей мощности в защищенном исполнении т.к. помещение сухое, без пыли и грязи, серии 4А160S4УЗ. Каталожные данные выбранного двигателя:  $P_H = 15$  кВт,  $n_H = 1465$  об/мин,  $\eta_H = 88,5\%$ ,  $\cos\varphi_H = 0,88$ , кратность пускового момента  $K_{пуск} = 1,4$ , кратность пускового тока  $K_I = 7$ , коэффициент перегрузок  $\lambda = 2,3$ .

Проверим выбранный двигатель по перегрузочной способности и по условиям пуска.

Номинальный момент двигателя:

$$M_H = 9550 \frac{P_H}{n_H} = \frac{9550 \times 15}{1465} = 97,8 \text{ Н м}$$

Максимальный (критический) момент:

$$M_{\max} = \lambda \cdot M_H = 2,3 \times 97,8 = 228,9 \text{ Н м}$$

Пусковой момент:

$$M_{пуск} = K_{пуск} M_H = 1,4 \times 97,8 = 136,9 \text{ Н м}$$

Максимальный статический момент (наибольший момент по нагрузочной диаграмме)  $M_{\max.c} = 100 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

По перегрузочной способности двигатель проходит, т. к. выполняется условие  $M_{\max.c} < 0,9 \cdot M_{\max}$  т.е.  $100 \text{ Н} \cdot \text{м} < 0,9 \times 228,9 = 206,01 \text{ Н} \cdot \text{м}$

Условие пуска двигателя под нагрузкой также выполняется  $M_{пуск} > M_1$  т.е.  $136,9 \text{ Н} \cdot \text{м} > 100 \text{ Н} \cdot \text{м}$  ( $M_1$  – первый момент по нагрузочной диаграмме).

Следовательно, двигатель для привода производственного механизма выбран верно.

### ЗАДАЧА 3

Подъемник грузоподъемностью 250 кг имеет грузовую платформу массой 200 кг, скорость движения платформы – 0,2 м/с, коэффициент полезного действия редуктора лебедки – 0,7, коэффициент полезного действия подъемного механизма – 0,8. Определить мощность электродвигателя лебедки при наличии противовеса и при отсутствии его. Массу противовеса принять равной 70% массы грузовой платформы.

Определим мощность электродвигателя лебедки в подъемнике без противовеса:

$$P = \frac{(G + G_0)v}{102\eta_n\eta_n} = \frac{(250 + 200) \cdot 0,2}{102 \cdot 0,8 \cdot 0,7} = 1,57 \text{ кВт}$$

Определим мощность электродвигателя лебедки в подъемнике с противовесом:

$$P = \frac{(G + G_0 - G_{np})v}{102\eta_n\eta_n} = \frac{(250 + 200 - 200 \cdot 0,7) \cdot 0,2}{102 \cdot 0,8 \cdot 0,7} = 1,08 \text{ кВт}$$

### 3.3 Задачи для самостоятельного решения

#### ЗАДАЧА 1

Рассчитать мощность и выбрать по каталогу асинхронный двигатель для привода насоса, работающего в продолжительном режиме и имеющего следующие паспортные данные: производительность  $Q = 0,5 \text{ м}^3/\text{с}$ , напор  $H = 8,2 \text{ м}$ , частота вращения  $n = 950 \text{ об/мин}$ , КПД  $\eta_n = 0,6$ , КПД передачи  $\eta_{п} = 1$ , плотность перекачиваемой жидкости  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ .

#### ЗАДАЧА 2

Для заданного режима нагрузки производственного механизма построить нагрузочную диаграмму  $P=f(t)$  и выбрать по каталогу мощность асинхронного короткозамкнутого двигателя.  $P_1=15 \text{ кВт}$ ,  $P_2=4 \text{ кВт}$ ,  $P_3=30 \text{ кВт}$ ,  $P_4=15 \text{ кВт}$ ,  $P_5=10 \text{ кВт}$ ,  $t_1=10 \text{ с}$ ,  $t_2=75 \text{ с}$ ,  $t_3=60 \text{ с}$ ,  $t_4=50 \text{ с}$ ,  $t_5=10 \text{ с}$ ,  $n = 950 \text{ об/мин}$ .

#### ЗАДАЧА 3

Для заданного режима нагрузки производственного механизма построить нагрузочную диаграмму  $P=f(t)$  и выбрать по каталогу мощность асинхронного короткозамкнутого двигателя.  $P_1=20 \text{ кВт}$ ,  $P_2=40 \text{ кВт}$ ,  $P_3=0 \text{ кВт}$ ,  $P_4=60 \text{ кВт}$ ,  $P_5=0 \text{ кВт}$ ,  $t_1=10 \text{ с}$ ,  $t_2=75 \text{ с}$ ,  $t_3=60 \text{ с}$ ,  $t_4=50 \text{ с}$ ,  $t_5=10 \text{ с}$ ,  $n = 1470 \text{ об/мин}$ .

#### ЗАДАЧА 4

Для заданного режима нагрузки производственного механизма построить нагрузочную диаграмму  $M=f(t)$  и выбрать по каталогу мощность асинхронного короткозамкнутого двигателя.  $M_1=10 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ,  $M_2=0 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ,  $M_3=20 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ,  $M_4=30 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ,  $M_5=40 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ,  $t_1=20 \text{ с}$ ,  $t_2=40 \text{ с}$ ,  $t_3=8 \text{ с}$ ,  $t_4=20 \text{ с}$ ,  $t_5=10 \text{ с}$ ,  $n = 2350 \text{ об/мин}$ .

#### ЗАДАЧА 5

Для расчета привода производственного механизма, режим работы которого задан нагрузочной диаграммой  $M=f(t)$ , необходимо: выбрать мощность электродвигателя, проверить двигатель по перегрузочной способности и пусковому начальному моменту.  $M_1 = 120 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ,  $M_2 = 60 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ,  $M_3=80 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ,  $M_4=170 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ,  $t_1=1 \text{ с}$ ,  $t_2=2 \text{ с}$ ,  $t_3=2 \text{ с}$ ,  $t_4=2 \text{ с}$ ,  $n = 1450 \text{ об/мин}$ .

## Приложение А

(справочное)

Таблица А1 – Технические характеристики трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором серии 4А

Тип	P <sub>н</sub> , кВт	При номинальном режиме			$\frac{M_{max}}{M_n}$	$\frac{M_n}{M_n}$	$\frac{I_n}{I_n}$
		n <sub>н</sub> , об/мин	η <sub>н</sub> , %	cosφ <sub>н</sub>			
Синхронная частота вращения 3000 об/мин							
4А63А2У3	0,37	2750	70,0	0,86	2,2	2,0	5,0
4А63В2У3	0,55	2740	73,0	0,86	2,2	2,0	5,0
4А71А2У3	0,75	2840	77,0	0,87	2,2	2,0	5,5
4А71В2У3	1,1	2810	77,5	0,87	2,2	2,0	5,5
4А80А2У3	1,5	2850	81,0	0,85	2,2	2,0	6,5
4А80В2У3	2,2	2850	83,0	0,87	2,2	2,0	6,5
4А90L2У3	3	2840	84,5	0,88	2,2	2,0	6,5
4А100S2У3	4	2880	86,5	0,89	2,2	2,0	7,5
4А100L2У3	5,5	2880	87,5	0,91	2,2	2,0	7,5
4А112M2У3	7,5	2900	87,5	0,88	2,2	2,0	7,5
4А132M2У3	11	2900	88,0	0,9	2,2	1,6	7,5
4А160S2У3	15	2940	88,0	0,91	2,2	1,4	7,5
4А160M2У3	18,5	2940	88,5	0,92	2,2	1,4	7,5
4А180S2У3	22	2940	88,5	0,91	2,2	1,4	7,5
4А180M2У3	30	2945	90,0	0,9	2,2	1,4	7,5
4А200M2У3	37	2945	90,0	0,89	2,2	1,4	7,5
4А200L2У3	45	2945	91,0	0,9	2,2	1,4	7,5
4А225M2У3	55	2945	91,0	0,92	2,2	1,2	7,5
4А250S2У3	75	2960	91,0	0,89	2,2	1,2	7,5
4А250M2У3	90	2960	92,0	0,9	2,2	1,2	7,5
4А280M2У3	132	2970	91,5	0,89	2,2	1,2	7,0
4А315M2У3	200	2970	92,5	0,9	1,9	1,0	7,0
Синхронная частота вращения 1500 об/мин							
4А71А4У3	0,55	1390	70,5	0,7	2,2	2,0	5,0
4А80А4У3	1,1	1420	75,0	0,81	2,2	2,0	5,0
4А80В4У3	1,5	1415	77,0	0,83	2,2	2,0	5,0
4А90L4У3	2,2	1425	80,0	0,83	2,2	2,0	6,0
4А100S4У3	3,0	1435	82,0	0,83	2,4	2,0	6,0
4А100L4У3	4,0	1430	84,0	0,84	2,4	2,0	6,0
4А112M4У3	5,5	1445	85,5	0,85	2,2	2,0	7,0
4А132S4У3	7,5	1455	87,5	0,86	3,0	2,2	7,0
4А132M4У3	11	1460	87,5	0,87	3,0	2,2	7,0
4А160S4У3	15	1465	88,5	0,88	2,3	1,4	7,0
4А180S4У3	22	1470	90,0	0,9	2,3	1,4	6,5
4А200L4У3	45	1475	92,0	0,9	2,5	1,4	7,0

Продолжение таблицы А1

Тип	P <sub>н</sub> , кВт	При номинальном режиме			$\frac{M_{max}}{M_n}$	$\frac{M_n}{M_n}$	$\frac{I_n}{I_n}$
		n <sub>н</sub> , об/мин	η <sub>н</sub> , %	cosφ <sub>н</sub>			
Синхронная частота вращения 1500 об/мин							
4A250M4Y3	90	1480	93,0	0,91	2,3	1,2	7,0
4A280S4Y3	110	1470	92,5	0,90	2,0	1,2	5,5
4A315S4Y3	160	1480	93,5	0,91	2,2	1,3	6,0
4A355S4Y3	250	1485	94,5	0,92	2,0	1,2	7,0
4A355M4Y3	315	1485	94,5	0,92	2,0	1,2	7,0
Синхронная частота вращения 1000 об/мин							
4A80B6Y3	1,1	920	74,0	0,74	2,2	2,0	4,0
4A90L6Y3	1,5	935	75,0	0,74	2,2	2,0	4,5
4A100L6Y3	2,2	950	81,0	0,73	2,2	2,0	5,0
4A112MA6Y3	3	955	81,0	0,76	2,5	2,0	6,0
4A112MB6Y3	4	950	82,0	0,81	2,5	2,0	6,0
4A132S6Y3	5,5	965	85,0	0,80	2,5	2,0	6,5
4A160S6Y3	11	975	86,0	0,86	2,0	1,2	6,0
4A180M6Y3	18,5	975	88,0	0,87	2,0	1,2	5,0
4A200L6Y3	30	980	90,5	0,90	2,4	1,3	6,5
4A250S6Y3	45	985	91,5	0,89	2,1	1,2	6,5
4A280S6Y3	75	985	92,0	0,89	2,2	1,4	5,5
4A280M6Y3	90	985	92,5	0,89	2,2	1,4	5,5
4A315M6Y3	132	985	93,5	0,90	2,2	1,4	6,5
4A355M6Y3	200	985	94,0	0,90	2,2	1,4	6,5
Синхронная частота вращения 750 об/мин							
4A71B8Y3	0,25	680	56,0	0,65	1,7	1,6	3,0
4A80A8Y3	0,37	675	61,5	0,65	1,7	1,6	3,5
4A100L8Y3	1,5	700	74,0	0,65	1,9	1,6	4,0
4A112MA8Y3	2,2	700	76,5	0,71	2,2	1,9	5,0
4A160M8Y3	11	730	87,0	0,75	2,2	1,4	6,0
4A200M8Y3	18,5	735	88,5	0,82	2,0	1,2	6,0
4A200L8Y3	22	730	88,5	0,84	2,0	1,2	5,5
4A225M8Y3	30	735	90,0	0,81	2,1	1,3	6,0
4A250S8Y3	37	735	90,0	0,83	2,0	1,2	6,0
4A250M8Y3	45	740	91,0	0,84	2,0	1,2	6,0
4A280S8Y3	55	735	92,0	0,84	2,0	1,2	5,5
4A280M8Y3	75	735	92,5	0,85	2,0	1,2	5,5
4A315S8Y3	90	740	93,0	0,85	2,3	1,2	6,5
4A315M8Y3	110	740	93,0	0,85	2,3	1,2	6,5
4A355S8Y3	132	740	93,5	0,85	2,2	1,2	6,5
4A355M8Y3	160	740	93,5	0,85	2,2	1,2	6,5

Таблица А2 – Технические характеристики трехфазных асинхронных двигателей с контактными кольцами серии 4А

Тип	P <sub>н</sub> , кВт	При номинальном режиме			$\frac{M_{max}}{M_n}$	$\frac{M_n}{M_n}$	$\frac{I_n}{I_n}$
		S <sub>н</sub> , %	η <sub>н</sub> , %	cosφ <sub>н</sub>			
Синхронная частота вращения 1500 об/мин							
4АК160S4УЗ	11	5,0	86,5	0,86	3,0	2,0	5,0
4АК160М4УЗ	14	4,0	88,5	0,87	3,5	2,0	5,0
4АК180М4УЗ	18	3,5	89	0,88	4,0	2,0	5,5
4АК200М4УЗ	22	2,5	90	0,87	4,0	2,0	5,5
4АК200L4УЗ	30	2,5	90,5	0,87	4,0	2,0	6,5
4АК225М4УЗ	37	3,5	90	0,87	3,0	2,0	6,5
4АК250М4УЗ	71	2,5	91,5	0,86	3,0	2,0	6,5
4АНК250М4УЗ	110	3,5	92	0,9	2,5	1,6	7,5
4АНК280М4УЗ	160	2,6	92,5	0,88	2,0	1,4	7,5
4АНК315S4УЗ	200	2,5	93	0,89	2,0	1,2	7,5
4АНК355S4УЗ	315	2,2	93,5	0,9	2,0	1,6	7,5
4АНК355М4УЗ	400	2,0	94	0,9	2,0	1,4	7,5
Синхронная частота вращения 1000 об/мин							
4АК160S6УЗ	7,5	5,0	82,5	0,77	3,5	2,0	7,5
4АК160М6УЗ	10	4,5	84,5	0,76	3,8	2,0	7,5
4АК180М6УЗ	13	4,5	85,5	0,8	4,0	2,0	7,5
4АК200М6УЗ	18,5	3,5	88	0,81	3,5	1,9	7,5
4АК200L6УЗ	22	3,5	88	0,8	3,5	1,9	7,5
4АК250М6УЗ	45	3,0	90,5	0,87	2,5	1,4	7,5
4АНК280М6УЗ	110	3,6	91,5	0,87	1,9	1,2	7,5
4АНК315S6УЗ	132	3,0	92	0,87	1,9	1,2	7,0
4АНК355S6УЗ	200	2,5	93	0,89	1,8	1,2	7,0
Синхронная частота вращения 750 об/мин							
4АК160S8УЗ	5,5	6,5	80	0,7	2,5	1,9	5,0
4АК160М8УЗ	7,5	6,0	82	0,7	3,0	2,0	5,0
4АК180М8УЗ	11	4,0	85,5	0,72	3,5	2,0	5,0
4АК200М8УЗ	15	3,5	86	0,7	3,0	2,0	6,0
4АК200L8УЗ	18,5	3,5	86	0,73	3,0	2,0	6,0
4АК225М8УЗ	22	4,5	87	0,82	2,2	1,6	6,0
4АК250S8УЗ	30	4,0	88,5	0,81	2,2	1,6	7,0
4АК250М8УЗ	37	3,5	89	0,8	2,2	1,4	7,0
4АНК250SB8УЗ	45	4,0	89	0,82	2,2	1,4	7,0
4АНК280S8УЗ	75	4,0	90,5	0,84	2,2	1,2	7,0
4АНК315S8УЗ	110	3,5	91,5	0,84	1,9	1,2	6,5
4АНК355S8УЗ	160	2,7	92,5	0,86	1,7	1,0	7,0
4АНК355М8УЗ	200	2,7	92,5	0,86	1,7	1,2	7,0

Таблица А3 – Технические характеристики трехфазных асинхронных двигателей серии АИР

Тип	P <sub>H</sub> , кВт	При номинальном режиме			$\frac{M_{max}}{M_n}$	$\frac{M_n}{M_n}$	$\frac{I_n}{I_n}$
		S <sub>n</sub> , %	η <sub>n</sub> , %	cosφ <sub>n</sub>			
Синхронная частота вращения 3000 об/мин							
АИР80А2	1,5	5,0	81	0,85	2,2	2,1	7,0
АИР90L2	3,0	5,0	84,5	0,88	2,2	2,0	7,0
АИР112М2	7,5	3,5	87,5	0,88	2,2	2,0	7,5
АИР160S2	15	3,0	90	0,89	2,7	1,8	7,0
АИР180М2	30	2,5	91,5	0,9	3,0	2,2	7,5
АИР200М2	37	2,0	91,5	0,87	2,8	1,6	7,0
АИР200S2	45	2,0	92	0,88	2,8	1,8	7,5
АИР225М2	55	2,0	92,5	0,91	2,6	1,8	7,5
АИР250S2	75	2,0	93	0,9	3,0	1,8	7,5
АИР250М2	90	2,0	93	0,92	3,0	1,8	7,5
Синхронная частота вращения 1500 об/мин							
АИР132М4	11	3,5	87,5	0,87	2,7	2,0	7,5
АИР160М4	18,5	3,0	90,5	0,89	2,9	1,9	7,0
АИР180S4	22	2,5	90,5	0,87	2,4	1,7	7,0
АИР180М4	30	2,0	92	0,87	2,7	1,7	7,0
АИР200М4	37	2,0	92,5	0,89	2,7	1,7	7,5
АИР200S4	45	2,0	92,5	0,89	2,7	1,7	7,5
АИР225М4	55	2,0	93	0,89	2,6	1,7	7,0
АИР250S4	75	1,5	94	0,88	2,5	1,7	7,5
АИР250М4	90	1,5	94	0,89	2,5	1,5	7,5
АИР355S4	250	2,0	94,5	0,92	2,0	1,4	7,0
4ИР355М4	315	2,0	94,5	0,92	2,0	1,4	7,0
Синхронная частота вращения 1000 об/мин							
АИР112МА6	3,0	5,0	81	0,76	2,2	2,0	6,0
АИР160S6	11	3,0	88	0,83	2,7	2,0	6,5
АИР200М6	22	2,0	90	0,83	2,4	1,6	6,5
АИР56В4	30	2,5	90	0,85	2,4	2,0	6,5
АИР63А4	37	2,0	91	0,85	2,3	1,5	6,5
АИР63В4	45	2,0	92,5	0,85	2,3	1,5	6,5
АИР71А4	55	2,0	92,5	0,86	2,3	1,5	6,5
АИР71В4	75	2,2	92,5	0,9	2,2	1,3	6,5
АИР80А4	90	2,2	93	0,9	2,4	1,4	6,5
АИР80В4	110	2,3	93	0,92	2,3	1,4	6,0
АИР90L4	132	2,3	93,5	0,9	2,3	1,4	6,5
АИР100S4	160	2,2	94	0,9	2,0	1,6	7,0
4ИР355М6	200	2,2	94,5	0,9	2,0	1,6	7,0

### Список литературы

- 1 Данилов, И.А. Общая электротехника: учебное пособие. – М.: Высшее образование, 2009. – 674 с.
- 2 Савилов, Г.В. Электротехника и электроника: курс лекций. – М.: Дашков и К, 2008. – 322 с.
- 3 Полещук, В.И. Задачник по электротехнике и электронике: учебное пособие для студентов вузов. – М.: Академия, 2009. – 223 с.
- 4 Прянишников, В.А. Электротехника и ТОЭ в примерах и задачах: практическое пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 336 с.
- 5 Березкин Т.Ф. Задачник по общей электротехнике и основам электроники: / Т.Ф.Березкин, Н.Г. Гусев, В.В. Масленников. – М: Высшая школа, 1991. – 284 с.

Учебное издание

Методические указания к практическим занятиям  
по дисциплине  
«Электротехника»

Составитель  
**Скапцова** Тамара Рагимовна

Редактор А.А. Щербакова  
Технический редактор М.О. Хлыстова

Подписано в печать                      Формат 60x84 1/16    Бумага офсетная.  
Гарнитура Таймс. Ризография. Усл. печ. л.                      Уч.-изд. л.  
Тираж                      экз.    Заказ

Учреждение образования «Могилёвский государственный университет  
продовольствия».  
Пр-т Шмидта, 3, 212027, Могилёв.  
ЛИ №02330/0131913 от 08.02.2007.

Отпечатано в учреждении образования «Могилёвский государственный  
университет продовольствия».  
Пр-т Шмидта, 3, 212027, Могилёв

