

# **Электротехника и электроника**

Составитель  
А. П. Щербаков

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Санкт-Петербургский государственный  
университет технологии и дизайна»

## Электротехника и электроника

Методическое пособие и контрольные задания  
для студентов заочного обучения

Составитель  
А.П. Щербаков

Санкт-Петербург  
2015

Утверждено на заседании  
кафедры физики

---

протокол №

Рецензент  
К. Г. Иванов

Оригинал подготовлен составителями и издан в авторской редакции.

Подписано в печать 2015 г.

Формат 60×84 1/16

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,2

Тираж 100 экз. Заказ .

Сайт: <http://www.sutd.ru>

E-mail: [phicssutd@mail.ru](mailto:phicssutd@mail.ru)

Отпечатано в типографии СПГУТД,  
191028, Санкт-Петербург, ул. Моховая, 26

## Задание 1.

### Расчет сложной цепи постоянного тока

#### Общие сведения.

Электрической цепью называют совокупность электротехнических устройств, образующих путь для электрического тока, электромагнитные процессы в которых могут быть описаны с помощью электрических величин – электродвижущей силы, тока и напряжения.

В простейшем случае, расчет электрической цепи заключается в нахождении токов, протекающих через отдельные элементы цепи. При расчете, цепи условно делят на простые и сложные, методики расчета простых и сложных цепей существенно различаются. Любая электрическая цепь содержит ветви и узлы. Ветвь – это участок цепи по которому проходит электрический ток одного значения и направления. Точку электрического соединения трех и более ветвей (или элементов электрической цепи), называют узлом.

Простыми электрическими цепями называют цепи с одним источником энергии.

Сложной, независимо от количества элементов цепи и последовательности их соединения, считают электрическую цепь, содержащую два и более источника энергии, расположенные в разных ветвях.

#### Законы Кирхгофа

При расчете сложной электрической цепи, как правило используют законы Кирхгофа или метод контурных токов, основанный на применении второго закона Кирхгофа.

Первый закон Кирхгофа, являющийся уравнением электрического состояния токов для узла, и основанный на законе сохранения энергии формулируется так: алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле электрической цепи в любой момент времени равна нулю, т.е.

$$\sum_{k=1}^n i_k = 0.$$

При этом, токи направленные к узлу, как правило, считают положительными, выходящие из узла, – отрицательными.

Второй закон Кирхгофа, являющийся уравнением электрического состояния контура, формулируется так: алгебраическая сумма падений напряжений на элементах замкнутого контура электрической цепи равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в данном контуре

$$\sum_{k=1}^n U_k = \sum_{p=1}^m E_p,$$

где  $n$  – число пассивных элементов в контуре;  $m$  – число источников ЭДС.

При этом, если направление обхода контура совпадает с направлением тока в элементе – падение напряжения считается положительным, если не совпадает – отрицательным, если направление ЭДС источников совпадает с направлением обхода контура ЭДС считается положительной, если не совпадает – отрицательной.

### **Методика решения задачи при непосредственном применении законов Кирхгофа**

При решении конкретной задачи может быть рекомендована следующая последовательность действий:

1. проставить произвольно направление токов во всех ветвях электрической цепи;
2. разбить цепи на независимые контура (независимым считается контур не содержащий внутри себя элементов смежных контуров);
3. записать систему уравнений по первому закону Кирхгофа для всех узлов цепи, исключив один узел (какой узел будет исключен, значения не имеет);
4. к составленной системе уравнений добавить контурные уравнения, составленные по второму закону Кирхгофа, число добавленных уравнений должно равняться числу независимых контуров;
5. проверить достаточность количества уравнений – число уравнений должно равняться числу неизвестных токов;
6. решив полученную систему уравнений найти токи во всех ветвях цепи.

### **Метод контурных токов**

Приведенная выше методика расчета позволяет производить расчет

цепей любой сложности, но при большом числе независимых контуров система уравнений становится громоздкой. Существенно сократить число уравнений системы возможно с помощью введения вспомогательных неизвестных.

В качестве таких неизвестных можно ввести условные контурные токи, считая что эти токи протекают в каждом в каждом независимом контуре, совершенно независимо от токов смежных контуров. В этом случае число необходимых уравнений уменьшается до числа независимых контуров.

Очевидно, что в данном случае принимается допущение, что через один элемент могут в разных направлениях протекать одновременно два разных контурных тока, при этом реальный ток будет равен алгебраической сумме соответствующих контурных токов. При составлении уравнений это будет заключаться в том, что в левой части будут присутствовать два падения напряжения на одном элементе цепи.

### **Методика решения задачи методом контурных токов**

При решении задачи рекомендуется следующая последовательность действий:

1. проставить произвольно направления истинных токов во всех ветвях электрической цепи;
2. разбить цепь на независимые контура;
3. проставить направления условных контурных токов в каждом независимом контуре;
4. составить уравнения электрического состояния по второму закону Кирхгофа для каждого контура, используя в качестве неизвестных условные контурные токи;
5. решив полученную систему уравнений найти условные контурные токи;
6. определить истинные токи в ветвях электрической цепи;
7. при определении истинных токов в ветвях, считать, что истинный ток в элементе равен разности контурных токов, протекающих через данный элемент цепи.

### **Контрольная задача**

В электрической цепи, изображенной на рисунке 1, известны ЭДС источников питания и сопротивления резисторов (их конкретные значения необходимо взять из таблицы расчетных данных).

Определить токи во всех ветвях двумя методами: при помощи непосредственного использования законов Кирхгофа и методом контурных токов, полученные результаты сравнить.

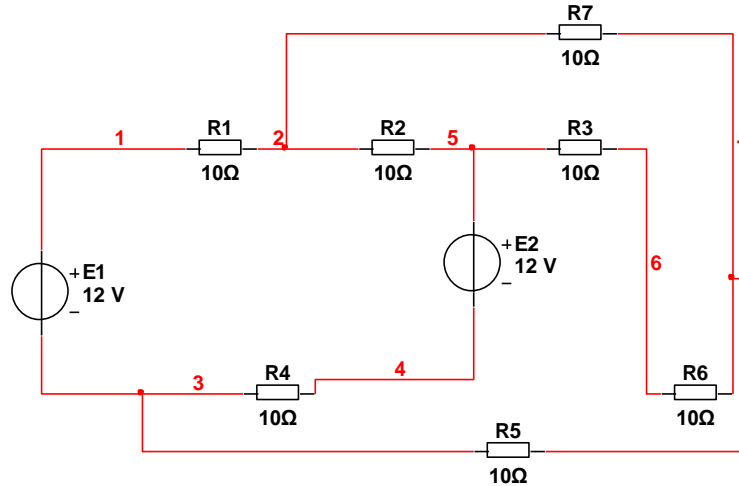


Рис. 1. Схема электрической цепи к задаче 1

Расчетные данные к задаче 1.

| Вариант | E1<br>В | E2<br>В | E3<br>В | R1<br>Ом | R2<br>Ом | R3<br>Ом | R4<br>Ом | R5<br>Ом | R6<br>Ом | R7<br>Ом |
|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1       | 10      | 10      | 12      | 8        | 6        | 4        | 10       | 12       | 5        | 6        |
| 2       | 5       | 5       | 10      | 12       | 6        | 10       | 8        | 8        | 10       | 5        |
| 3       | 10      | 8       | 6       | 5        | 10       | 12       | 6        | 8        | 8        | 6        |
| 4       | 8       | 12      | 5       | 8        | 4        | 7        | 12       | 9        | 6        | 5        |
| 5       | 8       | 10      | 8       | 10       | 10       | 12       | 10       | 10       | 5        | 8        |
| 6       | 10      | 15      | 6       | 8        | 10       | 12       | 10       | 8        | 10       | 10       |

| Вариант | E1<br>B | E2<br>B | E3<br>B | R1<br>Om | R2<br>Om | R3<br>Om | R4<br>Om | R5<br>Om | R6<br>Om | R7<br>Om |
|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 7       | 8       | 8       | 8       | 10       | 6        | 7        | 5        | 10       | 8        | 10       |
| 8       | 10      | 10      | 10      | 5        | 6        | 8        | 7        | 10       | 8        | 8        |
| 9       | 8       | 9       | 8       | 6        | 7        | 9        | 5        | 12       | 10       | 8        |
| 10      | 8       | 9       | 8       | 7        | 10       | 12       | 10       | 8        | 6        | 5        |
| 11      | 14      | 10      | 3       | 4        | 8        | 6        | 8        | 8        | 5        | 6        |
| 12      | 10      | 10      | 15      | 10       | 8        | 8        | 8        | 6        | 6        | 6        |
| 13      | 10      | 10      | 20      | 9        | 4        | 8        | 10       | 12       | 12       | 4        |
| 14      | 12      | 10      | 12      | 10       | 8        | 10       | 8        | 6        | 7        | 8        |
| 15      | 10      | 10      | 20      | 9        | 10       | 8        | 14       | 12       | 12       | 4        |
| 16      | 10      | 15      | 10      | 8        | 15       | 8        | 10       | 15       | 12       | 4        |
| 17      | 10      | 12      | 25      | 6        | 12       | 8        | 14       | 12       | 18       | 4        |
| 18      | 10      | 15      | 24      | 9        | 4        | 8        | 12       | 12       | 12       | 6        |
| 19      | 10      | 10      | 20      | 10       | 6        | 8        | 15       | 12       | 14       | 4        |
| 20      | 10      | 10      | 25      | 9        | 7        | 8        | 20       | 10       | 12       | 6        |
| 21      | 10      | 15      | 20      | 12       | 5        | 8        | 8        | 15       | 14       | 4        |
| 22      | 10      | 15      | 20      | 10       | 8        | 8        | 15       | 12       | 15       | 6        |



| Вариант | E1<br>В | E2<br>В | E3<br>В | R1<br>Ом | R2<br>Ом | R3<br>Ом | R4<br>Ом | R5<br>Ом | R6<br>Ом | R7<br>Ом |
|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 23      | 10      | 20      | 20      | 9        | 4        | 8        | 10       | 10       | 12       | 4        |
| 24      | 10      | 18      | 20      | 8        | 6        | 8        | 15       | 12       | 10       | 7        |
| 25      | 10      | 15      | 20      | 6        | 4        | 8        | 10       | 10       | 14       | 4        |
| 26      | 10      | 14      | 20      | 9        | 5        | 8        | 15       | 12       | 12       | 8        |

## Задание 2.

### Расчет электрической цепи с использованием теории комплексных чисел

#### Общие сведения

При расчете цепей переменного тока применение векторных диаграмм позволяет достигнуть наглядности и, в ряде случаев, существенно упрощает расчет. Но, как и все графические построения, векторные диаграммы не всегда обеспечивают требуемую точность. Значительным шагом вперед, по сравнению с методом векторных диаграмм, явилось введение Штейнмецем математического аппарата теории комплексных чисел в теорию переменных токов, что позволило свести геометрические операции над векторами к алгебраическим операциям над комплексными числами. (В литературе предложенный Штейнмецем метод иногда называют символическим). В России математический аппарат теории комплексных чисел был введен в широкое употребление академиком В.Ф.Миткевичем.

Теория комплексных чисел позволяет объединить простоту векторных диаграмм с возможностью проводить расчеты с любой желаемой степенью точности, особенно при расчете сложных цепей не сводящихся к последовательному или параллельному соединениям.

Следует подчеркнуть, что рассматриваемый метод расчета непосредственно применим только в тех случаях, когда все э.д.с. и токи являются синусоидальными функциями времени.

## Способы представления комплексных чисел

Как известно из теории комплексных чисел, комплексное число  $A$  может быть представлено в трех формах:

алгебраической  $A = a_1 + ja_2$ ;

тригонометрической  $A = a(\cos\alpha + j\sin\alpha)$ ;

показательной  $A = ae^{ja}$ .

Для перехода от алгебраической формы записи к двум другим и обратно используются следующие соотношения:

$$a_1 = a \cos\alpha, \quad a_2 = a \sin\alpha, \quad a = \sqrt{a_1^2 + a_2^2}, \quad \alpha = \arctg \frac{a_2}{a_1}.$$

## Простейшие операции с комплексными числами

### Сложение и вычитание комплексных чисел

Для сложения и вычитания комплексных чисел они записываются в алгебраической форме. При сложении комплексов складываются отдельно их вещественные и мнимые составляющие, например:

$$A + B = (a_1 + ja_2) + (b_1 + jb_2) = (a_1 + b_1) + j(a_2 + b_2) = c_1 + jc_2 = C.$$

При вычитании комплексов соответственно вычитаются отдельно их вещественные и мнимые составляющие. Вычитание комплексных чисел может быть заменено сложением уменьшаемого числа с вычитаемым, взятым с обратным знаком, что следует из выражения

$$C = A - B = A + (-B).$$

(Отсюда следует, что вычитание векторов, представляющих комплексные величины, можно заменить сложением уменьшаемого вектора с вычитаемым вектором, взятым с обратным знаком).

### Умножение и деление комплексных чисел

Умножение и деление комплексов выполняется проще, если они записаны в показательной форме, например,

$$A e^{ja} B e^{jb} = AB e^{j(a+b)} = C e^{j\gamma}.$$

Таким образом, произведение двух комплексов представляет собой новый комплекс, модуль которого равен произведению модулей, а аргумент – алгебраической сумме аргументов перемножаемых комплексов.

Возможно и перемножение комплексов, записанных в алгебраической форме, но такие действия представляют собой достаточно трудоемкий процесс с возможными ошибками

$$\begin{aligned} AB &= (a_1 + ja_2)(b_1 + jb_2) = a_1b_1 + a_1jb_2 + ja_2b_1 + j^2 a_2b_2 = \\ &= (a_1b_1 - a_2b_2) + j(a_1b_2 + a_2b_1) = c_1 + jc_2 = C. \end{aligned}$$

Частное от деления комплекса на комплекс равно произведению комплекса делимого и комплекса обратного делителю, например,

$$\frac{A}{B} = A \frac{1}{B} = \frac{|A|}{|B|} e^{j(a-b)} = |C| e^{j\gamma} = C.$$

Таким образом, частное от деления одного комплекса на другой представляет собой новый комплекс, модуль которого равен частному от деления модулей, а аргумент равен алгебраической разности аргументов делимого и делителя.

Если делимое и делитель заданы в алгебраической форме, то следует устранить мнимость в знаменателе, что достигается умножением числителя и знаменателя дроби на комплекс, сопряженный делителю

$$\frac{A}{B} = [(a_1 + ja_2)/(b_1 + jb_2)][(b_1 - jb_2)/(b_1 - jb_2)] = c_1 + jc_2 = C.$$

### Закон Ома

Если выразить ток, протекающий через участок цепи, и падение напряжения на нем в комплексной форме

$$\dot{I} = I e^{ja}, \quad \dot{U} = U e^{jb},$$

то частное от деления напряжения на зажимах участка цепи на ток называется комплексным сопротивлением участка цепи

$$Z = \dot{U}/\dot{I}.$$

Придав выражению другой вид

$$\dot{I} = \dot{U}/Z,$$

получим уравнение называемое законом Ома в комплексной (или в символической) форме. Следует обратить внимание, что точка над буквой  $Z$  не ставится, точка ставится только над комплексами, обозначающими синусоидально изменяющиеся величины, кроме того комплекс  $Z$  не зависит от начальных фаз тока и напряжения.

## Контрольная задача

В электрической цепи, представленной на рисунке 2, известно напряжение на входе цепи и параметры отдельных элементов цепи. Определить токи во всех ветвях. Частота сети питания 50 Гц. При решении задачи использовать теорию комплексных чисел.

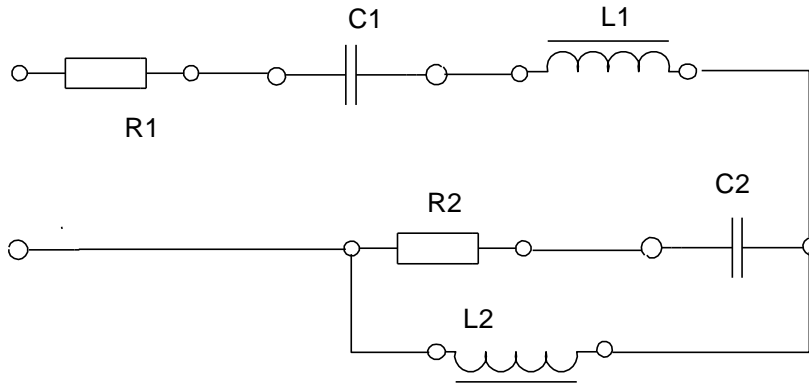


Рис. 2. Схема электрической цепи к задаче 2

Расчетные данные к задаче 2.

| Вариант | $U_{\text{питания}}$<br>В | R1<br>Ом | R2<br>Ом | C1<br>мкФ | C2<br>мкФ | L1<br>Гн | L2<br>Гн |
|---------|---------------------------|----------|----------|-----------|-----------|----------|----------|
| 1       | 100                       | 50       | 20       | 10        | 20        | 0,5      | 0,5      |
| 2       | 120                       | 40       | 15       | 15        | 15        | 0,8      | 0,8      |
| 3       | 80                        | 50       | 50       | 10        | 15        | 1,0      | 0,5      |
| 4       | 100                       | 30       | 40       | 15        | 15        | 1,0      | 0,5      |
| 5       | 110                       | 20       | 20       | 10        | 10        | 0,8      | 0,8      |
| 6       | 100                       | 10       | 50       | 5         | 15        | 0,7      | 0,5      |
| 7       | 80                        | 12       | 30       | 10        | 20        | 1,0      | 2,0      |
| 8       | 220                       | 20       | 30       | 10        | 15        | 0,6      | 1,0      |
| 9       | 110                       | 20       | 30       | 15        | 10        | 1,0      | 1,5      |
| 10      | 115                       | 25       | 25       | 10        | 15        | 2,0      | 1,0      |
| 11      | 80                        | 20       | 40       | 15        | 15        | 0,8      | 1,5      |
| 12      | 220                       | 25       | 25       | 10        | 15        | 1,0      | 2,0      |
| 13      | 220                       | 15       | 15       | 10        | 5         | 1,0      | 1,5      |

| Вариант | U <sub>питания</sub><br>В | R1<br>Ом | R2<br>Ом | C1<br>мкФ | C2<br>мкФ | L1<br>Гн | L2<br>Гн |
|---------|---------------------------|----------|----------|-----------|-----------|----------|----------|
| 14      | 110                       | 10       | 20       | 12        | 10        | 0,5      | 0,5      |
| 15      | 100                       | 12       | 15       | 10        | 12        | 0,8      | 0,5      |
| 16      | 110                       | 15       | 25       | 8         | 10        | 0,9      | 0,6      |
| 17      | 80                        | 10       | 10       | 15        | 12        | 1,0      | 0,5      |
| 18      | 100                       | 15       | 12       | 8         | 6         | 0,5      | 0,8      |
| 19      | 110                       | 15       | 25       | 10        | 12        | 0,8      | 0,5      |
| 20      | 220                       | 25       | 30       | 15        | 20        | 1,0      | 0,5      |
| 21      | 110                       | 25       | 20       | 10        | 15        | 0,8      | 0,6      |
| 22      | 100                       | 20       | 30       | 20        | 15        | 1,0      | 1,2      |
| 23      | 110                       | 25       | 18       | 10        | 15        | 0,8      | 0,6      |
| 24      | 90                        | 20       | 25       | 12        | 14        | 1,0      | 0,8      |
| 25      | 100                       | 25       | 30       | 15        | 10        | 0,8      | 1,0      |

### Задание 3

#### Определение основных параметров трансформатора

##### Общие сведения

Электрическая энергия, вырабатываемая генераторами электростанций, передается потребителям, находящимся в большинстве случаев на больших расстояниях от станций. Для удешевления стоимости электропередачи и уменьшения потерь энергии в ней приходится повышать напряжение электропередачи до сотен киловольт. Это вызывает необходимость многократного изменения напряжения передаваемой электроэнергии, которое осуществляется трансформаторами. Трансформатором называется статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования электрической энергии одного напряжения в электрическую энергию другого напряжения. Изобретателем трансформатора был выдающийся ученый и конструктор П. Н. Яблочков. Работа трансформатора основана на явлении взаимной индукции.

Конструктивно трансформатор имеет две (или более) магнитно связанные обмотки с разным числом витков, расположенные на замкнутом магнитопроводе (сердечнике). Для снижения потерь от вихревых токов, сердечник набирается из тонких листов электротехнической стали, изолированных друг от друга слоем лака. Части сердечника, на которых расположены обмотки, называются стержнями, части сердечника замыкающие стержни, называются ярмом, внутреннее пространство между стержнями и ярмом называется окном.

Обмотка трансформатора, имеющая меньшее число витков, называется обмоткой низшего напряжения, обмотка, имеющая большее число витков, называется обмоткой высшего напряжения. Обмотка, подключаемая к сети питания, называется первичной, обмотка к которой подключается нагрузка, называется вторичной, если напряжение вторичной обмотки больше напряжения первичной, трансформатор называется повышающим, если меньше - понижающим. Если напряжения первичной и вторичной обмоток равны, трансформатор называется разделительным.

По конструкции сердечника трансформаторы делятся на стержневые, броневые и тороидальные. Стержневую конструкцию имеют сердечники трансформаторов большой мощности, броневые сердечники применяют для трансформаторов малой мощности и микротрансформаторов. Трансформаторы малой мощности с тороидальными сердечниками имеют высокий КПД и небольшие габариты, но отличаются трудоемкостью изготовления. Достаточно часто применяют у трансформаторов малой мощности применяют сердечники навитые из тонкой стальной ленты (так называемые витые сердечники). Трансформаторы делятся на трехфазные и однофазные, двухобмоточные и трехобмоточные, а также с расщепленными обмотками вторичного напряжения.

По роду изоляции и охлаждения трансформаторы подразделяются на масляные, с негорючим заполнением (совтоловые) и сухие. Трансформаторы с расщепленными обмотками имеют две или более вторичные обмотки одинакового напряжения на 50% номинальной мощности каждая. В некоторых случаях расщепленные обмотки соединяют параллельно для повышения тока короткого замыкания (это делается в случаях резкопеременных, ударных нагрузок). Типы и исполнения трансформаторов выбираются в зависимости от условий их установки, температуры окружающей среды, ее состояния, и т.п. в загрязненных зонах предприятий при наружной установке применяют трансформаторы с усиленной изоляцией вводов.

Для внутренней установки применяют преимущественно масляные трансформаторы. Трансформаторы, заполненные совтолом, целесообразно применять при невозможности приблизить к центрам нагрузок масляные трансформаторы и в то же время недопустима установка сухих негерметизированных трансформаторов. Так как совтол выделяет вредные пары, вдыхание которых вызывает раздражение слизистых оболочек, то совтоловое хозяйство на предприятиях не предусматривается и любые операции с ними производит специальный персонал. В случаях неисправности совтоловых трансформаторов их направляют на централизованную ремонтную базу. Сухие трансформаторы имеют ограниченное применение, так как они дороже масляных. Сухие трансформаторы целесообразно применять при небольшой мощности нагрузки (до 400 кВ А) и при первичном напряжении до 10 кВ. В основном они применяются там, где недопустима установка масляных трансформаторов из-за пожарной опасности, а трансформаторов с негорючей жидкостью из-за токсичности, например, в административных зданиях, клубах, местах скопления людей, в помещениях, где хранятся горючие материалы и т.д.

Необходимо учитывать, что для сухих трансформаторов опасны грозовые перенапряжения, а при работе они дают повышенный шум. Для установки сухих трансформаторов подходят сухие не пыльные помещения с относительной влажностью не выше 65%. Сухие и совтоловые трансформаторы можно устанавливать непосредственно в производственных помещениях без ограничения мощности, а также в подвалах и на любых этажах зданий. Масляные трансформаторы нельзя ставить выше второго этажа и ниже уровня первого этажа более чем на 1м. При выборе типа трансформатора необходимо учитывать, что сухие и совтоловые трансформаторы в 2,5-3 раза дороже масляных.

### **Принцип действия трансформатора**

Принцип действия трансформатора удобно рассматривать на примере двух режимов работы – режима холостого хода и работе под нагрузкой.

Холостым ходом трансформатора называется такой режим, при котором его первичная обмотка подключена к питающей сети с номинальным напряжением, а вторичная обмотка разомкнута и ток в ней отсутствует.

Под действием напряжения сети питания по первичной обмотке протекает переменный ток холостого хода имеющий активную и реактивную составляющие

$$I_{1x} = \sqrt{I_{ax}^2 + I_{px}^2} .$$

Активная составляющая обусловлена активными потерями в стали сердечника трансформатора, а реактивная составляющая – магнитным потоком в сердечнике. Если для изготовления сердечника использована качественная электротехническая сталь, активная составляющая тока холостого хода много меньше реактивной и ток холостого хода  $I_{1x}$  напряжения на угол, близкий к  $90^0$ . По величине ток холостого хода составляет 4-10% номинального тока первичной обмотки.

Произведение первичного тока и числа витков первичной обмотки называется магнитодвижущей (намагничивающей) силой

$$F_{1x} = I_{1x} w_1.$$

Магнитодвижущая сила создает магнитный поток трансформатора, большая часть которого замыкается по сердечнику. Этот поток пронизывает витки первичной и вторичной обмоток и называется рабочим. Он индуцирует в обмотках ЭДС, действующие значения которых определяются выражениями:

$$\begin{aligned} E_1 &= 4,44 f w_1 \Phi_m; \\ E_2 &= 4,44 f w_2 \Phi_m. \end{aligned}$$

Обе ЭДС отстают от потока на  $90^0$  и совпадают по фазе.

Небольшая часть потока замыкается по воздуху и пронизывает только витки первичной обмотки, создавая так называемый поток рассеяния  $\Phi_{p1}$ . Этот поток индуцирует в первичной обмотке ЭДС рассеяния

$$E_{1p} = 4,44 f w_1 \Phi_{p1}.$$

В практических расчетах ЭДС рассеяния удобнее выражать через индуктивное сопротивление рассеяния

$$E_{p1} = I_{1x} \omega L = I_{1x} X_1.$$

Величина  $X_1$  называется индуктивным сопротивлением рассеяния первичной обмотки. (Чем больше насыщение стали и чем хуже собран магнитопровод трансформатора, тем больше величина  $X_1$ , а значит и падение напряжения на первичной обмотке). Падение напряжения на первичной обмотке в режиме холостого хода ничтожно мало, следовательно,

$$U_1 = E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m.$$



При холостом ходе ток во вторичной обмотке  $I_2$  равен нулю, следовательно и падение напряжения на ней отсутствует, и

$$U_2 = E_2 = 4,44fw_2\Phi_M.$$

Отношение большей ЭДС к меньшей называется коэффициентом трансформации трансформатора  $k$

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

В режиме холостого хода из-за отсутствия потерь в обмотках

$$k = \frac{U_1}{U_2}.$$

При работе под нагрузкой, под действием ЭДС  $E_2$  по вторичной обмотке и через нагрузку будет протекать ток  $I_2$

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{(R_2 + R_n)^2 + (X_2 + X_n)^2}}.$$

Реактивное сопротивление вторичной обмотки  $X_2$  обусловлено потоком рассеяния вторичной обмотки.

По закону Ленца индуцируемая ЭДС всегда имеет такое направление, при котором вызванный ею ток  $I_2$  препятствует изменению магнитного потока в магнитопроводе трансформатора. Отсюда следует, что токи  $I_1$  и  $I_2$  практически встречно и поток  $\Phi_M$  создается совместным действием магнитодвижущих сил первичной и вторичной обмоток

$$\bar{F}_1 + \bar{F}_2 = \bar{F}_x.$$

Следовательно, магнитный поток в сердечнике трансформатора постоянен и не зависит от режима работы.

Для определения основных параметров трансформатора проводят два опыта – опыт холостого хода и опыт короткого замыкания. По результатам опыта холостого хода узнают коэффициент трансформации трансформатора и потери в сердечнике, а из опыта короткого замыкания определяют напряжение короткого замыкания и активные и индуктивные сопротивления первичной и вторичной обмоток.

### Основные расчетные соотношения

Коэффициент полезного действия трансформатора при любой нагрузке определяется по формуле

$$\eta = \frac{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2}{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_x + \beta^2 P_k}$$

В данном случае

$$\beta = I_2 / I_{2 \text{ ном}},$$

коэффициент нагрузки, определяемый как отношение тока во вторичной обмотке к его номинальному значению. Полная мощность, потребляемая трансформатором при номинальной нагрузке

$$S_{\text{ном}} = U_{1 \text{ ном}} I_{1 \text{ ном}}$$

Максимальное значение КПД конкретного трансформатора определяется выражением

$$\beta = \sqrt{P_x / P_k}$$

Потери холостого хода, обусловленные нагревом стали сердечника

$$P_x = P_{\text{ст}}$$

$$P_x = I_x U_{1 \text{ ном}} \cos \varphi_1$$

Полное сопротивление при холостом ходе трансформатора

$$Z_x = U_{1 \text{ ном}} / I_x$$

Активное сопротивление при холостом ходе

$$R_x = Z_x \cos \varphi_x$$

Потери короткого замыкания

$$P_k = I_{1 \text{ ном}} U_k \cos \varphi_k = I_{1 \text{ ном}}^2 R_k = P_{\vartheta 1} + P_{\vartheta 2}$$

В данном случае  $U_k$  - номинальное напряжение на первичной обмотке трансформатора, при котором токи в обмотках имеют номинальное значение при замкнутой накоротко вторичной обмотке. Мощность потребляемая трансформатором при проведении опыта короткого замыкания расходуется на нагрев обмоток.

Полное сопротивление при коротком замыкании

$$Z_k = U_{k..} / I_{1ном}.$$

Активное сопротивление короткого замыкания

$$R_k = Z_k \cos \varphi_k.$$

Если пренебречь током холостого хода, можно считать, что

$$I_1 / I_2 = w_2 / w_1$$

### Контрольная задача

В таблице приведены результаты испытаний однофазного трансформатора в режимах холостого хода и короткого замыкания. В опыте короткого замыкания указаны суммарные электрические потери первичной и вторичной обмоток, значения которых одинаковы.

Определить коэффициент трансформации, коэффициенты мощности ( $\cos \varphi$ ) при холостом ходе и коротком замыкании, полное, активное и индуктивное сопротивления обмоток, максимальный и номинальный КПД трансформатора.

Расчетные данные к задаче 4

| Вариант | $U_{1ном}$<br>В | $U_{2ном}$<br>В | $I_{1 ном}$<br>А | $U_k$<br>В | $I_x$<br>А | $P_x$<br>Вт | $P_k$<br>Вт |
|---------|-----------------|-----------------|------------------|------------|------------|-------------|-------------|
| 1       | 10000           | 380             | 2,5              | 500        | 0,25       | 125         | 600         |
| 2       | 6000            | 220             | 2,0              | 300        | 0,18       | 90          | 450         |
| 3       | 10000           | 380             | 3,0              | 500        | 0,3        | 130         | 620         |
| 4       | 6000            | 660             | 2,5              | 350        | 0,18       | 90          | 430         |
| 5       | 10000           | 380             | 2,5              | 480        | 0,22       | 130         | 590         |
| 6       | 6000            | 220             | 3,0              | 450        | 0,2        | 85          | 430         |
| 7       | 10000           | 660             | 2,8              | 520        | 0,3        | 130         | 620         |
| 8       | 6000            | 380             | 2,2              | 380        | 0,21       | 85          | 410         |
| 9       | 10000           | 400             | 2,2              | 480        | 0,3        | 140         | 500         |
| 10      | 6000            | 400             | 2,4              | 310        | 0,19       | 160         | 410         |

| Вариант | $U_{1\text{ном}}$<br>В | $U_{2\text{ном}}$<br>В | $I_{1\text{ном}}$<br>А | $U_{\text{к}}$<br>В | $I_{\text{х}}$<br>А | $P_{\text{х}}$<br>Вт | $P_{\text{к}}$<br>Вт |
|---------|------------------------|------------------------|------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| 11      | 10000                  | 380                    | 4,0                    | 500                 | 0,4                 | 200                  | 700                  |
| 12      | 6000                   | 380                    | 2,6                    | 460                 | 0,35                | 180                  | 400                  |
| 13      | 1600                   | 400                    | 2,0                    | 280                 | 0,25                | 150                  | 250                  |
| 14      | 1600                   | 380                    | 2,2                    | 280                 | 0,24                | 160                  | 250                  |
| 15      | 3000                   | 400                    | 2,3                    | 300                 | 0,24                | 180                  | 280                  |
| 16      | 3000                   | 380                    | 2,3                    | 280                 | 0,22                | 190                  | 270                  |
| 17      | 27000                  | 660                    | 4,0                    | 310                 | 0,4                 | 200                  | 400                  |
| 18      | 10000                  | 660                    | 3,0                    | 500                 | 0,25                | 210                  | 280                  |
| 19      | 6000                   | 400                    | 2,8                    | 430                 | 0,24                | 200                  | 280                  |
| 20      | 6000                   | 380                    | 3,0                    | 380                 | 0,3                 | 250                  | 280                  |
| 21      | 10000                  | 660                    | 3,8                    | 400                 | 0,3                 | 300                  | 290                  |
| 22      | 6000                   | 380                    | 2,8                    | 350                 | 0,28                | 310                  | 300                  |
| 23      | 6000                   | 400                    | 2,7                    | 340                 | 0,29                | 290                  | 290                  |
| 24      | 10000                  | 380                    | 3,0                    | 410                 | 0,35                | 420                  | 450                  |
| 25      | 1600                   | 400                    | 4,0                    | 250                 | 0,29                | 180                  | 200                  |
| 26      | 3000                   | 380                    | 3,5                    | 300                 | 0,27                | 280                  | 250                  |

## Задание 4

### Расчет эксплуатационных параметров асинхронного электродвигателя

#### Общие сведения

Трехфазный асинхронный электродвигатель изобрел русский инженер М.О. Доливо-Добровольский в 1889 г. Асинхронные электродвигатели отличаются простотой конструкции, высокой надежностью, низкой стоимостью, могут работать в режиме двигателя, генератора, электромагнитного тормоза и благодаря перечисленным достоинствам широко применяются во всем мире во всех отраслях промышленности. В настоящее время асинхронные электродвигатели составляют 90 % общего парка электродвигателей.

Конструктивно асинхронный электродвигатель состоит из двух основных частей – неподвижного статора и вращающегося относительно статора ротора, при этом статор и ротор разделены небольшим воздушным зазором. Как правило, ротор располагается внутри статора, но существуют также электродвигатели у которых статор располагается внутри ротора.

Статор асинхронного двигателя состоит из станины, внутри которой расположен стальной сердечник – пакет статора. Для уменьшения потерь мощности на вихревые токи он набирается из тонких штампованных листов электротехнической стали. На рисунке 3 представлен внешний вид пакета статора и одного из листов. На внутренней поверхности пакета статора имеются пазы в которые укладываются секции трехфазной статорной обмотки.

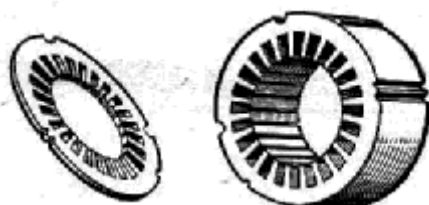


Рис.3. Пакет статора и штампованный лист

Как правило, имеется возможность соединять обмотки фаз статора звездой или треугольником, для чего на щиток двигателя выводятся шесть концов обмоток.

Пакет ротора асинхронного электродвигателя представляет собой стальной цилиндр, также набранный из тонких штампованных листов и закрепленный на валу двигателя. На наружной поверхности ротора имеются пазы, аналогичные пазам статора в которые помещается роторная обмотка. По устройству обмотки ротора асинхронные электродвигатели делятся на два типа: двигатели с короткозамкнутым ротором и двигатели с фазным ротором.

На рисунке 4а представлена медная стержневая обмотка короткозамкнутого ротора (беличья клетка), впервые предложенная Доливо-Добровольским. Он предложил в пазы пакета ротора вставлять медные стержни, лишенные изоляции, а концы стержней замыкать накоротко медными кольцами. Подобные обмотки применяют в современных двигателях мощностью более 100 кВт.

На рисунке 4б представлен ротор с медными стержнями в сборе. В менее мощных машинах стержни изготавливают прямой заливкой пазов ротора расплавленным алюминием, заодно со стержнями на обоих торцах ротора отливают кольца с вентиляционными лопастями (рисунок 4в). На рисунке 4г показан стандартный символ асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, применяемый на электрических схемах.

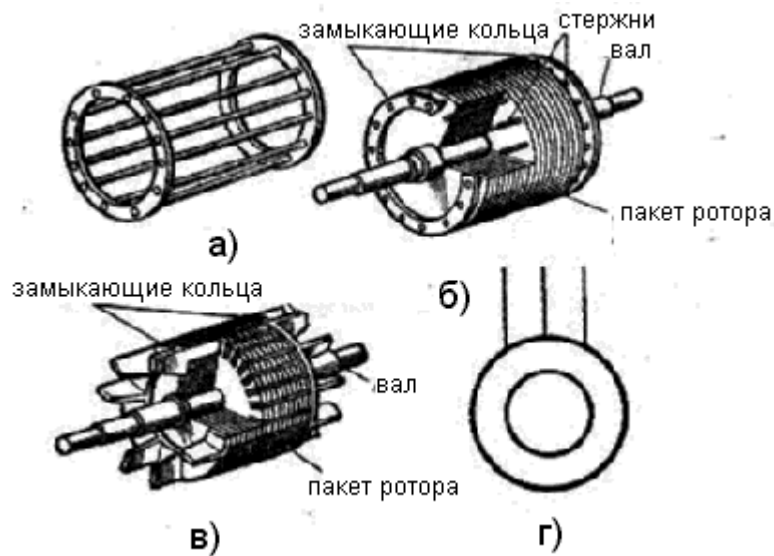


Рис.4. Варианты конструкции короткозамкнутого ротора

У фазного ротора в пазы пакета уложена трехфазная обмотка аналогичная статорной, при этом фазы обмотки всегда включают звездой, а три свободных конца обмотки присоединяют к трем медным контактными кольцам, закрепленным на валу при помощи диэлектрических втулок. По контактными кольцам скользят щетки, выводы от которых расположены на корпусе статора.

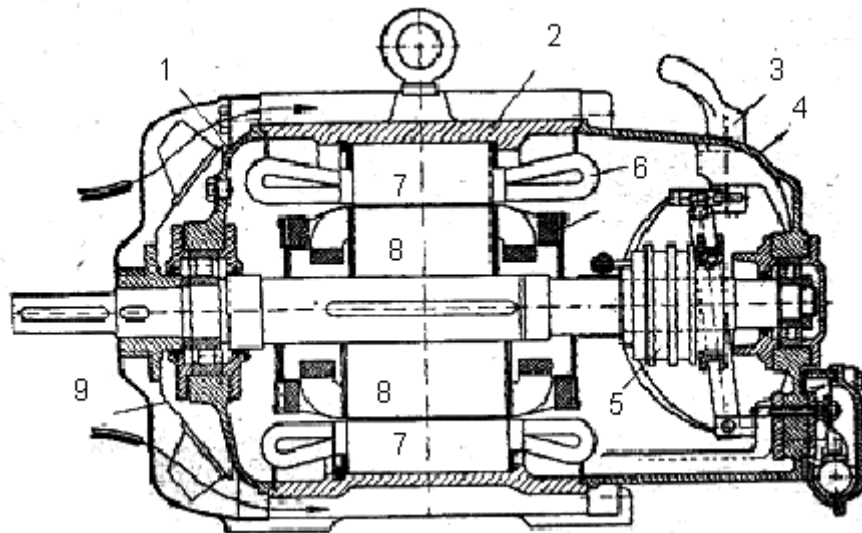


Рис. 5. Продольный разрез асинхронного электродвигателя с фазным ротором

На рисунке 5 представлен продольный разрез асинхронного электродвигателя с фазным ротором. Верхняя половина соответствует исполнению на 1500 об/мин, нижняя 1000 об/мин. На рисунке применены следующие обозначения: 1-передний подшипниковый щит, 2 – корпус статора, 3 – рукоятка подъема щеток, 4- задний подшипниковый щит, 5 – контактные кольца, 6 – обмотка статора, 7 – пакет статора, 8 – пакет ротора, 9 – вентилятор

При помощи контактных колец и щеток в цепь обмотки ротора можно вводить активные сопротивления (реостаты). Введение активного сопротивления в цепь ротора при пуске двигателя позволяет с одной стороны уменьшить пусковой ток, а с другой – увеличить пусковой момент на валу.

В ряде конструкций двигателей с фазным ротором имеется приспособление позволяющее после пуска поднимать щетки одновременно замыкая контактные кольца.

Трехфазные асинхронные электродвигатели с контактными кольцами считаются электрическими машинами специализированного исполнения.

### **Принцип действия асинхронного электродвигателя**

При подключении обмоток статора к трехфазной сети питания по обмоткам будет протекать переменный ток  $I_1$ , который создаст внутри статора вращающийся магнитный поток  $\Phi$ , замыкающийся по сердечникам статора и ротора. Силовые линии этого потока будут пересекать проводники обмоток ротора и статора и в них по закону электромагнитной индукции будут индуцироваться ЭДС  $E_1$  и  $E_2$ , как в первичной и вторичной обмотках трансформатора. Под влиянием ЭДС  $E_2$  по обмотке ротора потечет ток  $I_2$ . Взаимодействие тока  $I_2$  и потока  $\Phi$  создает электромагнитные силы, приводящие ротор во вращение, вслед за вращающимся потоком  $\Phi$ . Таким образом, асинхронный электродвигатель с электрической точки зрения, представляет собой трансформатор с вращающейся вторичной обмоткой и способный поэтому превращать электрическую энергию в механическую.

Для реверсирования двигателя нужно поменять местами два любых провода трехфазной сети питания на клеммах двигателя. При этом поменяется порядок чередования фаз и магнитный поток  $\Phi$  будет вращаться в другую сторону.

Из принципа действия двигателя следует, что ротор всегда имеет частоту вращения  $n_2$  отличную от частоты вращения магнитного потока  $n_1$ , как бы проскальзывая относительно него. Численно величина проскальзывания определяется по формуле

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1},$$

а величина  $s$  называется скольжением асинхронного двигателя.

Чем больше нагрузка на валу двигателя, тем меньше частота вращения ротора, так как больший момент сопротивления должен уравниваться большим вращающим моментом на валу двигателя. Последнее возможно только при увеличении  $E_2$  и  $I_2$ , а следовательно при большем значении  $s$ .

При номинальной нагрузке на валу скольжение составляет от 0,01 до 0,1, при этом меньшая цифра соответствует двигателям большой мощности, а большая – микродвигателям.

### Основные расчетные соотношения

Критическое скольжение – это скольжение, при котором двигатель развивает максимальный момент на валу

$$s_{кр} = s_{ном} (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}).$$

В приведенной формуле  $\lambda = M_{max} / M_{ном}$  - коэффициент, определяющий перегрузочную способность двигателя.

Частота вращения магнитного поля двигателя

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}.$$

Число пар полюсов обмотки статора зависит от способа соединения секций обмотки и у двигателей стандартно исполнения не превышает 4. У многоскоростных двигателей имеется возможность изменять число пар полюсов посредством переключения секций статорной обмотки.

Частота вращения ротора

$$n_2 = \frac{60f_1}{p} (1 - s).$$

Активная мощность, потребляемая двигателем от сети питания

$$P_1 = 3U_{1\phi} I_{1\phi} \cos \varphi,$$

или

$$P_1 = P_2 / \eta.$$

20



Реактивная мощность

$$Q_1 = 3U_{1\phi} i_{1\phi} \sin \varphi.$$

Вращающий момент на валу двигателя

$$M = 9,55P_2 / n_2.$$

Кратность пускового момента

$$K_M = M_{\text{пуск}} / M_{\text{ном}}.$$

Фазный ток в обмотке статора

$$I_\phi = \frac{P_1}{3U_\phi \cos \varphi}.$$

Кратность пускового тока

$$K_n = I_{\text{пуск}} / I_{\text{ном}}.$$

### Контрольная задача

Асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором подключен к трехфазной сети. Обмотки статора соединены звездой. Определить число пар полюсов двигателя, номинальное скольжение, номинальные пусковой и вращающие моменты на валу, номинальный и пусковой токи.

Расчетные данные к задаче 4

| Вариант | $U_1$<br>В | $P_2$<br>Вт | $n_2$<br>об/мин | $\eta$<br>% | $\cos \varphi$ | $K_n$ | $K_M$ | $\lambda$ |
|---------|------------|-------------|-----------------|-------------|----------------|-------|-------|-----------|
| 1       | 380        | 1000        | 2800            | 90          | 0,8            | 5,0   | 1,1   | 1,8       |
| 2       | 380        | 750         | 1360            | 88          | 0,85           | 5,5   | 1,0   | 1,9       |
| 3       | 380        | 3000        | 680             | 89          | 0,75           | 5,2   | 1,2   | 1,75      |
| 4       | 380        | 3000        | 2750            | 92          | 0,8            | 5,5   | 1,15  | 1,8       |
| 5       | 380        | 1000        | 940             | 85          | 0,8            | 6,0   | 1,1   | 1,65      |
| 6       | 380        | 1500        | 1440            | 86          | 0,82           | 5,5   | 1,2   | 2,0       |
| 7       | 660        | 1000        | 2800            | 85          | 0,75           | 5,2   | 1,0   | 1,7       |

| Вариант | $U_1$<br>В | $P_2$<br>Вт | $n_2$<br>об/мин | $\eta$<br>% | $\cos \varphi$ | $K_{\Pi}$ | $K_M$ | $\lambda$ |
|---------|------------|-------------|-----------------|-------------|----------------|-----------|-------|-----------|
| 8       | 660        | 3000        | 2820            | 89          | 0,8            | 5,1       | 1,15  | 1,75      |
| 9       | 660        | 3000        | 1440            | 89          | 0,85           | 6,0       | 1,2   | 1,9       |
| 10      | 660        | 1500        | 1440            | 85          | 0,87           | 5,3       | 1,1   | 1,85      |
| 11      | 660        | 1600        | 2810            | 88          | 0,85           | 5,2       | 1,25  | 1,8       |
| 12      | 660        | 3000        | 2820            | 89          | 0,89           | 5,0       | 1,1   | 1,75      |
| 13      | 660        | 6000        | 2850            | 90          | 0,86           | 4,9       | 1,2   | 1,8       |
| 14      | 660        | 1000        | 690             | 86          | 0,7            | 5,6       | 1,2   | 1,9       |
| 15      | 380        | 1000        | 890             | 78          | 0,7            | 5,8       | 1,1   | 1,8       |
| 16      | 380        | 1000        | 1380            | 78          | 0,75           | 6,0       | 1,2   | 1,9       |
| 17      | 380        | 3000        | 1380            | 79          | 0,8            | 6,0       | 1,25  | 1,85      |
| 18      | 380        | 3000        | 2890            | 80          | 0,81           | 5,9       | 1,1   | 1,9       |
| 19      | 380        | 3000        | 680             | 79          | 0,78           | 6,2       | 1,15  | 1,8       |
| 20      | 380        | 1500        | 680             | 79          | 0,8            | 6,3       | 1,2   | 2,0       |
| 21      | 660        | 7500        | 1380            | 85          | 0,79           | 6,0       | 1,1   | 1,8       |
| 22      | 660        | 7500        | 2850            | 84          | 0,75           | 5,8       | 1,25  | 1,7       |
| 23      | 660        | 3000        | 2840            | 87          | 0,82           | 5,1       | 1,2   | 1,8       |
| 24      | 660        | 3000        | 1460            | 87          | 0,81           | 5,1       | 1,15  | 1,7       |
| 25      | 660        | 6000        | 1480            | 89          | 0,83           | 6,0       | 1,3   | 1,68      |
| 26      | 660        | 6000        | 2880            | 88          | 0,82           | 6,1       | 1,2   | 1,6       |

## Задание 5

### Расчет усилительного каскада на биполярном транзисторе

#### Общие сведения

В электронике усилителем называется устройство, преобразующее энергию источника питания в энергию усиливаемого сигнала. Как правило, усилитель состоит из усилительных каскадов (в простейшем случае из одного), соединенных последовательно.

Каждый усилительный каскад представляет собой законченный функциональный узел, содержащий один или несколько активных элементов (транзисторов) и пассивные R-C цепи, обеспечивающие их функционирование в заданном режиме.

Как элемент электрической цепи, транзистор может быть включен таким образом, что один его вывод является входом, второй - выходом, а третий оказывается общим между входом и выходом. В зависимости от того, какой вывод транзистора будет общим различают три способа включения: с общим эмиттером, общей базой и общим коллектором.

Каждый из перечисленных способов включения имеет свои преимущества и недостатки, но наибольшее распространение получили усилительные каскады на основе транзисторов, включенных по схеме с общим эмиттером. На *рис. 6* представлена простейшая принципиальная схема подобного усилительного каскада.

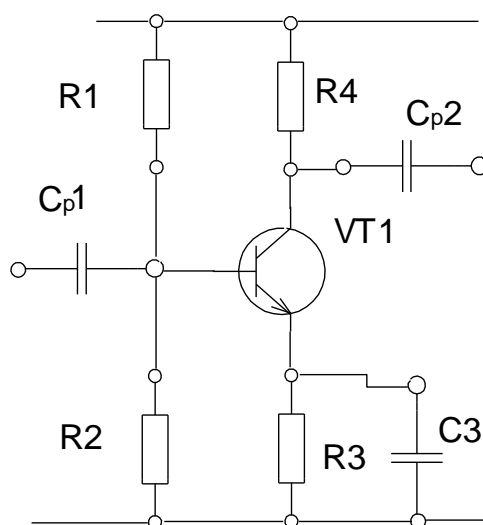


Рис. 6. Принципиальная схема усилительного каскада

Установка и стабилизация режима работы транзистора по постоянному току осуществляется с помощью базового делителя на резисторах  $R1$ ,  $R2$  и резистора в цепи эмиттера  $R3$ .

Связь каскада по переменному току с источником усиливаемого сигнала осуществляется с помощью конденсатора связи  $C_{p1}$ . Нагрузка каскада подключается к коллекторной цепи через конденсатор  $C_{p2}$ . Для увеличения коэффициента усиления по напряжению эмиттерный резистор  $R3$  шунтирован конденсатором  $C3$ .

Усиливаемый сигнал подается на базу транзистора через разделительный конденсатор  $C_{p1}$ . Вследствие того, что база транзистора соединена с базовым делителем, входное сопротивление каскада оказывается меньше входного сопротивления собственно транзистора. Поэтому величину сопротивлений базового делителя выбирают такой, чтобы уменьшение входного сопротивления было незначительно.

Но в любом случае некоторая часть тока входного сигнала бесполезно теряется в цепи базового делителя, оставшаяся часть тока поступает на базу транзистора и усиливается в соответствующее число раз.

Усиленный транзистором ток делится следующим образом: одна часть этого тока протекает через коллекторный резистор, другая часть теряется за счет наличия выходного сопротивления транзистора, остальная часть выходного тока через разделительный конденсатор  $C_{p2}$  поступает в нагрузку, на которой создается выходное напряжение усиленного сигнала.

Качество функционирования усилительного каскада всецело зависит от правильности выбора пассивных элементов, обеспечивающих оптимальный режим работы транзистора.

Одним из методов аналитического расчета усилительного каскада является расчет с использованием так называемых  $h$ -параметров (гибридных параметров) транзистора, позволяющий рассматривать транзистор как активный линейный четырехполюсник.

На практике используются следующие  $h$ -параметры:

$h_{11}$  – входное сопротивление транзистора при коротком замыкании на выходе;

$h_{12}$  – коэффициент обратной связи по напряжению при холостом ходе на выходе;

$h_{21}$  – коэффициент усиления (передачи) тока при коротком замыкании на выходе;

$h_{22}$  – выходная проводимость транзистора при холостом ходе на выходе.

Преимущество  $h$ -параметров заключается в простоте их непосредственного измерения, в то же время значения  $h$ -параметров зависят от способа включения транзистора (с общим эмиттером, общим коллектором или общей базой), поэтому параметры отдельных схем снабжают соответствующими индексами.

### **Порядок расчета усилительного каскада**

1. Определяем падение напряжения на коллекторном резисторе в состоянии покоя

$$U_{кн} = I_k R_4.$$

2. Рассчитываем ток базы транзистора в состоянии покоя

24

$$I_6 = I_k / h_{21э}$$

3. Определяем ток, протекающий по резисторам базового делителя

$$I_d = 5 I_6$$

4. Рассчитываем требуемое напряжение питания усилительного каскада

$$E_k = U_{кэ} + U_{кн} + U_э$$

5. Определяем падение напряжения на резисторе R2, принимая значение  $U_{6э} = 0,6 \text{ В}$

$$U_2 = U_э + U_{6э}$$

6. Определяем падение напряжения на резисторе R1, как разность напряжений питания  $E_k$  и падения напряжения на резисторе R2

$$U_1 = E_k - U_2$$

7. Рассчитываем сопротивление резистора R2

$$R2 = U_2 / I_d$$

8. Рассчитываем сопротивление резистора R1

$$R1 = U_1 / (I_d + I_6)$$

9. Находим входное сопротивление схемы  $R_{вх}$ , как эквивалентное сопротивление трех параллельно включенных резисторов R1, R2,  $h_{11э}$ .

10. Принимаем сопротивление нагрузки каскада  $R_n = (4-5) R4$ .

11. Рассчитываем сопротивление эмиттерного резистора

$$R3 = U_э / (I_k + I_6)$$

12. Проводим расчет величины емкости шунтирующего конденсатора в эмиттерной цепи

$$C3 = 1 / (2\pi f_H r_э)$$

где  $r_э = 2h_{12э} / h_{22э}$ .

13. Определяем емкость разделительного конденсатора на входе усилительного каскада

$$C_{p1} = 1 / f_H R_{вх}.$$

14. Определяем емкость разделительного конденсатора на выходе усилительного каскада

$$C_{p2} = 1 / f_H R_H.$$

15. Определяем коэффициент усиления по напряжению в области средних частот

$$K_u = h_{21э} R_{кн} / h_{11э},$$

где  $R_{кн}$  - эквивалентное сопротивление трех параллельно включенных резисторов  $R_4$ ,  $R_H$ ,  $R_{вых} = 1 / h_{22э}$ .

### Исходные данные для расчета

На основании исходных данных провести расчет усилительного каскада, на биполярном транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером. Представить описание принципа действия усилительного каскада с описанием назначения отдельных элементов схемы. Величина тока коллектора  $I_k$  выбирается в пределах 1-3 мА. Сопротивление нагрузки усилительного каскада  $R_H = (4-5) R_4$

При выполнении схемы конкретного усилительного каскада необходимо учитывать тип транзистора (р-п-р или п-р-п). Для определения типа транзистора можно воспользоваться любым справочником по биполярным транзисторам.

### Расчетные данные к задаче 5

| Вариант | Тип транзистора | $h_{11э}$<br>Ом | $h_{12э}$<br>( $\times 10^{-3}$ ) | $h_{21э}$ | $h_{22э}$<br>Ом <sup>-1</sup><br>( $\times 10^{-6}$ ) | $R_4$<br>кОм | $U_э$<br>В | $f_H$<br>Гц |
|---------|-----------------|-----------------|-----------------------------------|-----------|---|--------------|------------|-------------|
| 1       | КТ342А          | 4000            | 5                                 | 200       | 0.5   | 5,1          | 2          | 30          |
| 2       | КТ342Б          | 4000            | 5                                 | 250       | 0.5   | 10           | 2          | 50          |
| 3       | КТ342В          | 4000            | 5                                 | 300       | 0.5   | 4,8          | 2          | 100         |

| Вариант | Тип транзистора | $h_{11э}$<br>Ом | $h_{12э}$<br>( $\times 10^{-3}$ ) | $h_{21э}$ | $h_{22э}$<br>Ом <sup>-1</sup><br>( $\times 10^{-6}$ ) | R4<br>кОм | U <sub>э</sub><br>В | f <sub>н</sub><br>Гц |
|---------|-----------------|-----------------|-----------------------------------|-----------|---|-----------|---------------------|----------------------|
| 4       | ГТ322Б          | 3500            | 4                                 | 100       | 0.6   | 10        | 2,5                 | 30                   |
| 5       | КТ502А          | 3800            | 6                                 | 100       | 0.5   | 5,1       | 1,8                 | 50                   |
| 6       | КТ502Б          | 4000            | 6                                 | 200       | 0.5   | 5,1       | 1,2                 | 60                   |
| 7       | КТ502В          | 3200            | 6                                 | 100       | 0.5   | 10        | 2                   | 50                   |
| 8       | КТ382А          | 5000            | 5                                 | 200       | 0.8   | 5,6       | 1,2                 | 30                   |
| 9       | КТ382Б          | 5000            | 5                                 | 150       | 0.8   | 10        | 2                   | 50                   |
| 10      | КТ391А          | 4500            | 6                                 | 150       | 0.6   | 4,8       | 1,1                 | 30                   |
| 11      | КТ391Б          | 4500            | 6                                 | 100       | 0.6   | 5,6       | 1,2                 | 40                   |
| 12      | ГТ108А          | 3500            | 5                                 | 100       | 0.6   | 1,8       | 1,1                 | 65                   |
| 13      | ГТ108Б          | 3500            | 5                                 | 150       | 0.6   | 4,8       | 1,2                 | 100                  |
| 14      | КТ315А          | 4000            | 5                                 | 100       | 0,3   | 6,2       | 1,8                 | 65                   |
| 15      | КТ315Б          | 4000            | 5                                 | 200       | 0,32  | 10        | 2,1                 | 60                   |
| 16      | КТ315В          | 4000            | 6                                 | 200       | 0,35  | 8,2       | 1,6                 | 30                   |
| 17      | КТ361А          | 5000            | 5                                 | 100       | 0,4   | 5,6       | 1,2                 | 40                   |
| 18      | КТ361Б          | 4500            | 5                                 | 100       | 0,45  | 4,2       | 1,5                 | 100                  |
| 19      | КТ361В          | 4000            | 5                                 | 100       | 0,41  | 10        | 2,6                 | 80                   |
| 20      | КТ361Г          | 4000            | 5                                 | 100       | 0,42  | 8         | 3,0                 | 30                   |
| 21      | ГТ109А          | 3000            | 4                                 | 50        | 0,5   | 6         | 2,5                 | 40                   |
| 22      | ГТ109Б          | 3000            | 4                                 | 80        | 0,5   | 4         | 2,0                 | 50                   |
| 23      | ГТ109В          | 3000            | 4                                 | 100       | 0,4   | 3         | 3,0                 | 30                   |
| 24      | ГТ109Г          | 3000            | 3                                 | 200       | 0,4   | 5         | 1,8                 | 40                   |
| 25      | ГТ109Д          | 3000            | 3                                 | 70        | 0,5   | 6         | 2,6                 | 80                   |

## Задание 6

### Расчет мультивибратора на биполярных транзисторах

#### Общие сведения

В современной электронике широко применяются устройства, работающие в импульсном режиме. Импульсный режим характеризуется тем, что сигналы, вырабатываемые в устройстве или воздействующие на него, являются прерывистыми и имеют характер импульсов, действующих в течение короткого промежутка времени.

Импульсом называется кратковременное изменение напряжения (тока) в электрической цепи, длительность которого соизмерима или меньше длительности переходных процессов в этой цепи.

По форме используемые импульсы весьма разнообразны, но наиболее часто применяются следующие: прямоугольные, трапецеидальные, пилообразные, треугольные, экспоненциальные; колоколообразные.

Для генерации наиболее распространенных прямоугольных импульсов широко используются устройства, называемые мультивибраторами. В зависимости от назначения и схемного решения мультивибраторы могут функционировать в следующих режимах: режим генерации бесконечной последовательности импульсов (автоколебательный режим), ждущий режим (режим формирования одиночного импульса), режим формирования пачки импульсов (разновидность ждущего режима).

Мультивибратор, функционирующий в режиме генерации одиночного импульса называется одновибратором. Принципиальная схема симметричного мультивибратора с коллекторно-базовыми связями представлена на рис. 7.

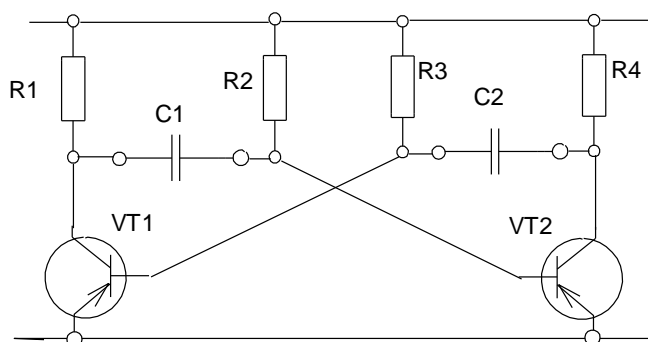


Рис. 7. Принципиальная схема симметричного мультивибратора

При подключении схемы к источнику питания оба транзистора пропускают коллекторные токи, так как их рабочие точки находятся в активной области за счет отрицательного смещения на базах.

Но такое состояние является неустойчивым из-за наличия в схеме положительной обратной связи.

Допустим, что в результате любого случайного изменения напряжения на базах или коллекторах транзисторов несколько увеличился ток  $I_{k1}$  транзистора VT1. При этом увеличится падение напряжения на резисторе R1 и на коллекторе транзистора VT1 увеличится положительный потенциал.



Поскольку напряжение на конденсаторе С1 мгновенно измениться не может, это увеличение потенциала будет приложено к базе VT2, в результате чего он начнет закрываться. Коллекторный ток VT2 уменьшится, напряжение на коллекторе VT2 станет более отрицательным, что еще более откроет транзистор VT1.

Процесс протекает лавинообразно и заканчивается тем, что транзистор VT1 переходит в режим насыщения (полностью открыт), а транзистор VT2 - в режим отсечки (полностью закрыт).

Открытое состояние транзистора VT1 обеспечивается отрицательным смещением через резистор R1, а закрытое состояние транзистора VT2 - положительным напряжением на конденсаторе С1, приложенным к базе VT2.

Далее, конденсатор С2 быстро заряжается по цепи эмиттер – база VT1, С2, R4 - до напряжения источника питания. В то же время конденсатор С1 разряжается через резистор R2, поддерживая закрытое состояние VT2. Как только С1 разрядится, транзистор VT2 открывается и развивается лавинообразный процесс, приводящий транзистор VT1 в состояние отсечки, а VT2 - в состояние насыщения.

Таким образом на выходе мультивибратора формируется напряжение, по форме близкое к прямоугольным импульсам.

Полный период колебаний симметричного мультивибратора определяется выражением

$$T = 1,4 R_2 (3) C_1 (2).$$

### Порядок расчета мультивибратора

1. Чертим схему мультивибратора с учетом типа транзистор и полярности напряжения питания.
2. Определяем напряжение питания мультивибратора

$$U_{\text{пит}} = 1,2 U_{\text{вых.}}$$

3. Определяем величину сопротивления коллекторных резисторов исходя из следующих условий:

$$R_1(4) < 0,1 R_{\text{н}}; R_1(4) > U_{\text{пит}} / I_{\text{к max.}}$$

4. Рассчитываем действительную амплитуду импульсов, считая что напряжение на коллекторе насыщенного транзистора составляет 0,2 В (на практике она должна несколько превышать заданное значение амплитуды выходных импульсов вследствие шунтирующего действия нагрузки, но в данной работе указанный фактор не оценивают).

5. Рассчитываем сопротивления резисторов в цепях баз транзисторов с учетом коэффициента насыщения  $S_{нас}$ .

$$R2(3) = R1(4) h_{21}/S_{нас}.$$

6. Рассчитываем емкости конденсаторов C1 и C2 во времязадающих цепочках на основании формулы

$$T = 1,4 R2(3) C1(2).$$

7. Оцениваем длительность фронта генерируемого импульса на уровне 90 % от амплитуды по формуле

$$T_{ф} = 2,3 R1(4)C1(2).$$

8. Убеждаемся, что длительность фронта менее  $T/2$ , в противном случае уменьшаем  $R1(4)$  или увеличиваем  $R2(3)$ .

### **Контрольная задача**

На основании исходных данных, провести расчет параметров элементов схемы симметричного мультивибратора на транзисторах с коллекторно-базовыми связями.

Необходимо привести принципиальную схему мультивибратора и представить подробное описание принципа действия мультивибратора с диаграммами напряжений на коллекторах и базах транзисторов соответствующие своему варианту расчета.

Схема симметричного мультивибратора на *рис.7* представлена без цепей питания. Указанные цепи и источник питания на схеме должны быть показаны

Расчетные данные к задаче 6

| Вари-<br>ант | Тип транзистора | $h_{21}$ | $I_{k(max)}$<br>мА | $U_{вых}$<br>В | $R_n$<br>кОм | $S_{нас}$ | $f$<br>кГц |
|--------------|-----------------|----------|--------------------|----------------|--------------|-----------|------------|
| 1            | КТ342А          | 200      | 50                 | 10             | 10           | 1,3       | 5,2        |
| 2            | КТ342Б          | 250      | 50                 | 8              | 12           | 1,5       | 5,2        |
| 3            | КТ342В          | 300      | 50                 | 6              | 10           | 1,7       | 10         |
| 4            | ГТ322Б          | 100      | 20                 | 10             | 14           | 1,3       | 10         |
| 5            | КТ502А          | 100      | 150                | 8              | 15           | 1,4       | 8          |
| 6            | КТ502Б          | 200      | 150                | 10             | 10           | 1,2       | 6          |
| 7            | КТ502В          | 100      | 150                | 6              | 8            | 1,5       | 5,2        |
| 8            | КТ382А          | 200      | 40                 | 8              | 10           | 1,6       | 12         |
| 9            | КТ382Б          | 150      | 40                 | 10             | 12           | 1,4       | 13         |
| 10           | КТ391А          | 150      | 30                 | 6              | 10           | 1,4       | 10         |
| 11           | КТ391Б          | 100      | 30                 | 8              | 14           | 1,3       | 5,8        |
| 12           | ГТ108А          | 100      | 50                 | 8              | 12           | 1,6       | 6,2        |
| 13           | ГТ108Б          | 150      | 50                 | 10             | 8            | 1,7       | 8,5        |
| 14           | КТ315А          | 100      | 100                | 19             | 9            | 1,5       | 3,0        |
| 15           | КТ315Б          | 200      | 100                | 88             | 10           | 1,4       | 4,0        |
| 16           | КТ315В          | 200      | 100                | 6              | 15           | 1,3       | 6,8        |
| 17           | КТ361А          | 100      | 30                 | 9              | 12           | 1,4       | 6,0        |
| 18           | КТ361Б          | 100      | 30                 | 10             | 20           | 1,4       | 10         |
| 19           | КТ361В          | 100      | 30                 | 6              | 13           | 1,5       | 12         |
| 20           | КТ361Г          | 100      | 30                 | 8              | 14           | 1,4       | 10         |
| 21           | ГТ109А          | 50       | 20                 | 5              | 5            | 1,5       | 15         |
| 22           | ГТ109Б          | 80       | 20                 | 6              | 4            | 1,5       | 10         |
| 23           | ГТ109В          | 100      | 20                 | 8              | 8            | 1,8       | 12         |
| 24           | ГТ109Г          | 200      | 20                 | 10             | 5            | 1,8       | 5          |
| 25           | ГТ109Д          | 70       | 20                 | 10             | 10           | 1,5       | 10         |

