

Федеральное агентство по образованию



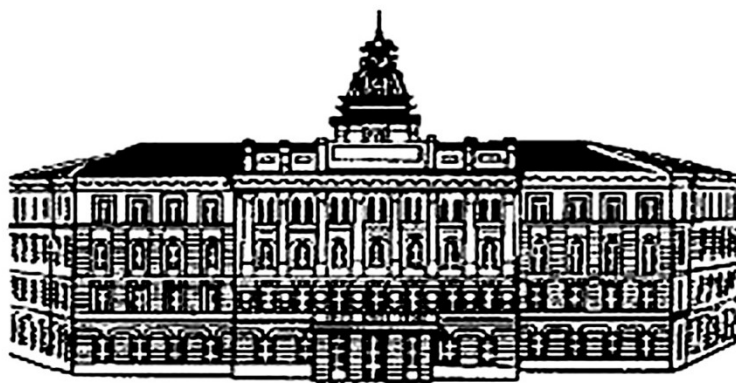
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Санкт-Петербургский государственный
технологический институт
(Технический университет)

Кафедра электротехники и электроники

Н.А.Александрова, В.П. Катушкин, В.В. Романенко

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Учебное пособие для студентов заочной формы обучения
по специальности «Информатика и вычислительная техника»



Санкт-Петербург

2009

УДК 621.3

Электротехника и электроника: Учебное пособие/
Александрова Н.А., Катушкин В.П., Романенко В.В. – СПб.: СПбГТИ
(ТУ), 2009. – 103 .

Учебное пособие предназначено для студентов 3 курса заочной формы обучения, изучающих дисциплину «Электротехника и электроника».

В пособии изложены основные темы учебного курса, методические указания для выполнения индивидуальных практических заданий и лабораторных работ, приведена литература для подготовки к экзамену по курсу «Электротехника и электроника».

Учебное пособие составлено в соответствии с рабочей программой дисциплины «Электротехника и электроника» по специальности «Информатика и вычислительная техника».

Рецензент: В.Н. Скобелев, канд. физ-мат. наук, доцент кафедры физики Санкт-Петербургского государственного технологического института (Технического университета).

Утверждено на заседании учебно-методической комиссии физико-математического отделения.

Рекомендовано к изданию РИСО СПбГТИ (ТУ)

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---------------|---|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 4 |
|---------------|---|

ЧАСТЬ 1 ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

| | |
|--|---|
| ТЕМА 1 ПЕРЕМЕННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ..... | 5 |
|--|---|

| | |
|--|----|
| ТЕМА 2 НЕРАЗВЕТВЛЕННЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.... | 20 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| ТЕМА 3 РАСЧЕТ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ ЭЛЕМЕНТОВ..... | 24 |
|--|----|

| | |
|---|-----------|
| Варианты заданий для расчета цепи с последовательным соединением приемников..... | 28 |
|---|-----------|

| | |
|---|----|
| ТЕМА 4 РАЗВЕТВЛЕННЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА..... | 30 |
|---|----|

| | |
|---|-----------|
| Варианты заданий для расчета цепи с параллельным соединением приемников..... | 33 |
|---|-----------|

| | |
|-----------------------------|----|
| ТЕМА 5 ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ..... | 34 |
|-----------------------------|----|

| | |
|---|-----------|
| Варианты заданий для расчета трехфазной цепи при соединении нагрузки звездой с нейтральным проводом..... | 41 |
|---|-----------|

| | |
|----------------------------|----|
| ТЕМА 6 ТРАНСФОРМАТОРЫ..... | 42 |
|----------------------------|----|

| | |
|------------------------------|----|
| Тема 7 ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ..... | 46 |
|------------------------------|----|

ЧАСТЬ 2. ЭЛЕКТРОНИКА

| | |
|---------------------------------------|----|
| ТЕМА 8 ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА..... | 58 |
|---------------------------------------|----|

| | |
|-----------------------|----|
| ТЕМА 9 УСИЛИТЕЛИ..... | 67 |
|-----------------------|----|

| | |
|---------------------------------------|----|
| ТЕМА 10 МНОГОКАСКАДНЫЕ УСИЛИТЕЛИ..... | 74 |
|---------------------------------------|----|

| | |
|---|----|
| МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ..... | 81 |
|---|----|

| | |
|--|----|
| ЛИТЕРАТУРА ПО КУРСУ «ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА»..... | 98 |
|--|----|

| | |
|---|-----|
| КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО КУРСУ «ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА»..... | 100 |
|---|-----|

ВВЕДЕНИЕ

Учебная дисциплина «Электротехника и электроника» относится к блоку общеинженерных дисциплин.

Целью курса является приобретение студентами знаний в области применения современных электротехнических и электронных устройств в химической технологии и исследовательской практике.

Задачами изучения дисциплины является формирование умений и навыков анализа электрических цепей, использования современных методов и приборов контроля параметров технологических процессов, выбора оптимальных методов и устройств для преобразования электрической энергии в механическую, выпрямления переменного тока, усиления слабых электрических сигналов.

Дисциплина «Электротехника и электроника» изучается студентами заочной формы обучения на 3 курсе в 6 семестре. Студенты выполняют 3 контрольные работы, 3 лабораторные работы и сдают итоговый экзамен по курсу.

ЧАСТЬ 1 ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ТЕМА 1 ПЕРЕМЕННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Широкое развитие электротехники началось в конце XVIII века. В 1799 г. итальянским физиком А. Вольтом был создан гальванический элемент. Это был первый источник постоянного напряжения, т.е. напряжения, не изменяющегося во времени по значению и направлению. В дальнейшем наряду с источниками постоянного напряжения (аккумуляторами, электрическими генераторами) стали применяться источники переменного напряжения.

Переменный ток в настоящее время имеет громадное практическое значение. Достаточно сказать, что во всем мире почти вся электрическая энергия вырабатывается в виде энергии переменного тока. Постоянный ток, необходимый в промышленности (электрохимия), транспорте (электротяга), связи и т.д., получается путем преобразования (выпрямления) переменного тока.

Преобладающие виды переменного тока и напряжения – синусоидальные, т.е. периодически изменяющиеся во времени по закону синусоидальной функции:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i) \quad (1.1)$$

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u) \quad (1.2)$$

Широкое применение синусоидального тока обусловлено рядом причин, важнейшие из которых следующие:

1) при помощи трансформаторов можно получать переменный ток различного напряжения: высокого – для передачи энергии на большие расстояния и низкого – для питания потребителей.;

2) синусоидальная форма переменного тока характеризуется наибольшей экономичностью при передаче и распределении электрической энергии, а также относительно простым математическим аппаратом, используемым для расчета генераторов, приемников электрической энергии и электрических цепей.

3) конструкция генераторов переменного тока проще, чем генераторов постоянного тока;

4) электрические двигатели переменного тока проще по конструкции и надежнее двигателей постоянного тока, что обеспечило их широкое применение в быту и во всех отраслях, за исключением транспорта.

1.1 Основные понятия и определения

Переменным называют ток, периодически изменяющийся по своему значению и направлению. Простейшей и наиболее желательной формой периодического процесса является синусоидальная кривая. Расчет цепей синусоидального тока относительно прост, так как сумма, разность синусоидальных функций, производная и интеграл от синусоиды дают синусоиду, отличающуюся от исходной амплитудой и фазой. Например, если ток синусоиден, то синусоидальна и индуцируемая им ЭДС самоиндукции $e = -L di/dt$.

На рисунке 1.1 показан график переменного тока, изменяющегося по синусоидальному закону: $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$, где i – **мгновенное значение тока**, т.е. значение функции в рассматриваемый момент времени;

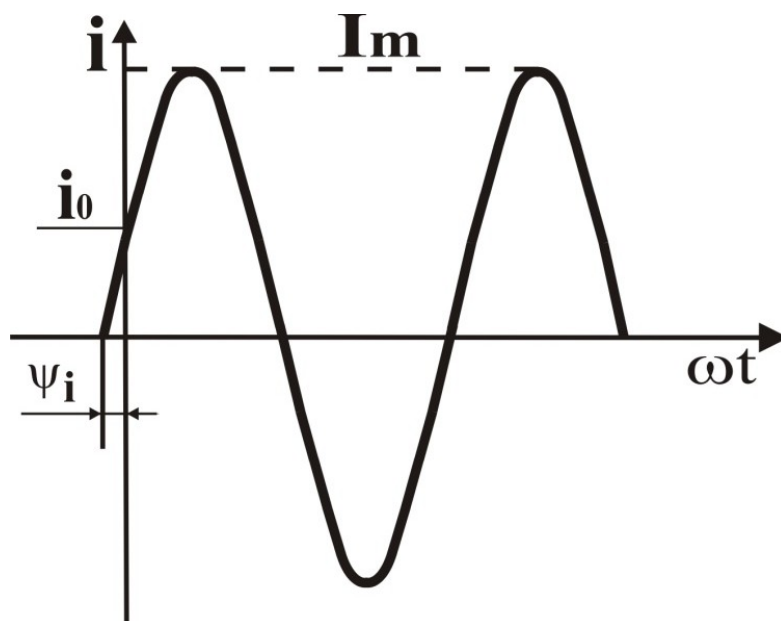


Рисунок 1.1 – Временная диаграмма синусоидального тока

I_m – максимальное или **амплитудное значение тока**, т.е. наибольшее из мгновенных значений;

$(\omega t + \psi_i)$ – фаза (**фазовый угол**) синусоидального тока – **аргумент синусоидальной функции**, отсчитываемый от точки перехода тока через нуль к положительному значению;

ψ_i – **начальная фаза** тока, показывающая значение фазового угла в начальный момент времени. Для функции, приведенной на рисунке 1.1 $\psi_i > 0$.

Наименьший промежуток времени, по прошествии которого мгновенные значения переменной величины (тока, напряжения или

ЭДС) повторяются в той же последовательности, называется **периодом Т** (измеряется в секундах), а совокупность изменений, происходящих в течение периода – **циклом**.

Величина, обратная периоду, называется **частотой** и обозначается буквой f (измеряется в Гц):

$$f = \frac{1}{T} \quad (1.3)$$

Частота численно равна числу периодов в единицу времени.

В энергосистемах России принята стандартная частота $f = 50$ Гц, что соответствует периоду $T = 0.02$ с. Причины такого выбора просты: понижение частоты неприемлемо, поскольку уже при частоте 40 Гц лампы накаливания заметно для глаз мигают, а ее повышение отрицательно влияет на передачу электроэнергии и на работу многих электротехнических устройств (снижает КПД).

Число периодов за 2π секунд называют **угловой частотой** и обозначают ω :

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (1.4)$$

Угловая частота показывает скорость изменения фазы тока (измеряется в с^{-1}).

Таким образом, всякая синусоидальная величина характеризуется:

- 1) **амплитудой**;
- 2) **частотой** или периодом;
- 3) **начальной фазой**.

Разность начальных фаз двух синусоидальных величин одной частоты называется **углом сдвига фаз** (рисунок 1.2 (а)):

$$\psi_u - \psi_i = \varphi \quad (1.5)$$

Та величина, у которой нулевые значения (после которых она принимает положительные значения) или положительные амплитудные значения достигаются раньше, чем у другой, считается **опережающей по фазе**, а та, у которой те же значения достигаются позже – **отстающей по фазе**. Относительно тока и напряжения, представленных на рисунке 1.2 (а), можно сказать, что ток опережает по фазе напряжение на угол φ , или что напряжение отстает от тока по фазе на угол φ .

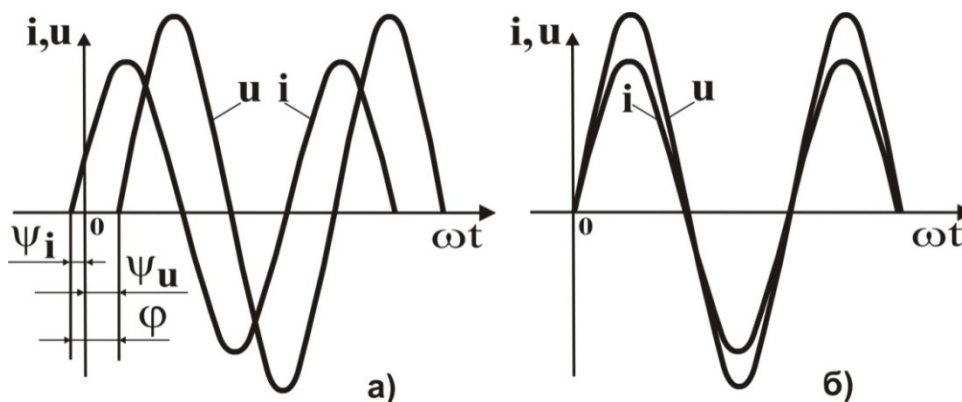


Рисунок 1.2 Временные диаграммы тока и напряжения с различными фазовыми сдвигами

Если две синусоидальные величины имеют одинаковые начальные фазы, то они одновременно достигают своих амплитудных и нулевых значений. В этом случае говорят, что величины **совпадают по фазе** (рисунок 1.2 (б)). Про синусоидальные величины, угол сдвига фаз которых равен 180° ($\varphi = \pi$), говорят, что одна из них изменяется в **противофазе** с другой.

1.2 Графическое изображение синусоидальных величин

Синусоидальные величины можно графически изображать или синусоидами (временные диаграммы), или **вращающимися векторами**.

Временная диаграмма – это график зависимости синусоидальной величины от времени. В данном случае ординаты синусоиды представляют мгновенные значения величины (в выбранном масштабе), а абсциссы – промежутки времени от начала отсчета времени. Такое изображение наглядно и позволяет найти амплитуду, период, начальную фазу и т.д. (см. рисунки 1.1, 1.2). Но при расчетах электрических цепей необходимо производить различные математические операции над этими функциями. Однако даже сложение двух синусоидальных функций графическим путем с помощью временных диаграмм или аналитическим путем с помощью уравнений этих кривых – операция достаточно громоздкая.

Расчет упрощается, и математические операции получают большую наглядность, если воспользоваться векторным изображением синусоидальных величин. Следует отметить, что изображенные с помощью векторов тока и напряжения не являются векторными величинами в обычном смысле слова. Это не пространственные векторы, направление которых указывает, на

направление действия данной физической величины (например, силы), а условные вращающиеся векторы.

В этом случае **синусоидальная величина изображается вектором, длина которого равна амплитудному значению величины, вращающимся против часовой стрелки с угловой скоростью ω** . Угол, образованный вектором с горизонтальной осью в начальный момент времени равен начальной фазе. Мгновенные значения синусоидальной величины выражаются проекциями вращающегося вектора на вертикальную ось (рисунок 1.3).

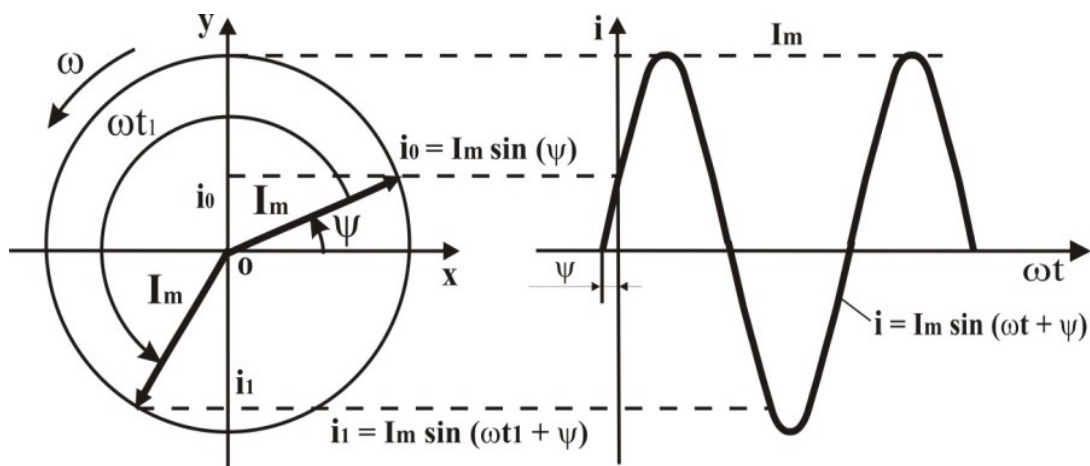


Рисунок 1.3 Графическое представление синусоидальной величины с помощью вращающегося вектора

Направление вектора в какой-либо момент времени t указывает значение фазы синусоидальной функции в данный момент, т.е. угол, на который повернулся вектор за время t .

Отметим еще раз, что векторы переменного тока представляют собой лишь удобную математическую форму изображения величин, изменяющихся во времени синусоидально.

Совокупность нескольких векторов, изображающих синусоидальные величины одинаковой частоты в начальный момент времени, называется **векторной диаграммой**.

На векторной диаграмме векторами изображают величины только одной определенной частоты. Таким образом, вращение векторов происходит с одной и той же угловой скоростью и, следовательно, взаимное расположение их остается неизменным. При сравнении синусоидально изменяющихся величин начало отсчета времени можно выбрать произвольно, т.е. один из векторов можно направить произвольно. Остальные векторы нужно располагать по отношению к первому под углами, равными соответствующим углам сдвига фаз, причем положительные углы откладываются в направлении, противоположном движению часовой стрелки.

Например, напряжения

$$u_1 = U_{1m} \sin(\omega t),$$

$$u_2 = U_{2m} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right),$$

$$u_3 = U_{3m} \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

можно представить в виде векторной диаграммы, причем вектор напряжения u_1 направим вдоль горизонтальной оси (рисунок 1.4 (а)).

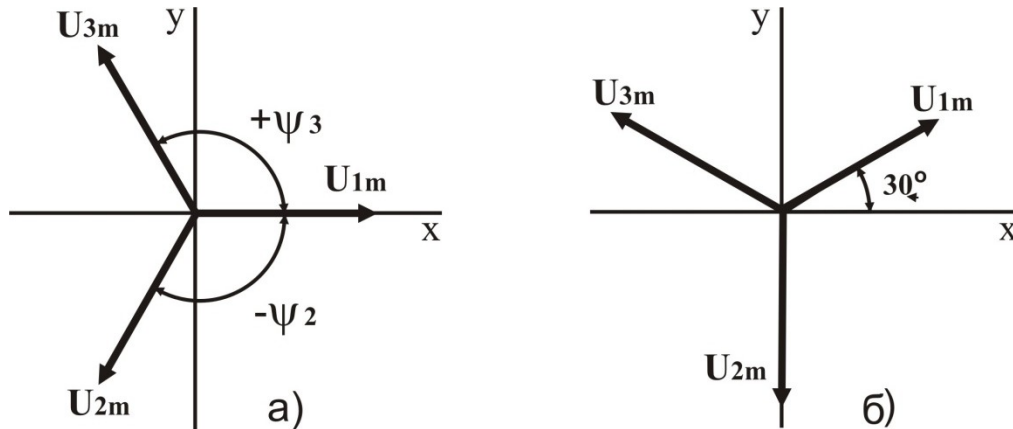


Рисунок 1.4 Векторная диаграмма напряжений

Напряжение u_2 отстает по фазе от напряжения u_1 на угол ψ_2 , и начальная фаза этого напряжения отрицательная ($-\psi_2$), поэтому вектор U_{2m} повернут относительно положительного направления оси абсцисс в отрицательном направлении (по направлению движения часовой стрелки). Напряжение u_3 опережает по фазе напряжение u_1 на угол ψ_3 , его начальная фаза равна $+\psi_3$. На векторной диаграмме вектор U_{3m} повернут относительно вектора U_{1m} в направлении противоположном движению часовой стрелки на угол ψ_3 .

Очевидно, что расположение векторов друг относительно друга не зависит от того, какой момент времени принят за начальный. Например, можно за начало отсчета времени при изображении напряжений u_1 , u_2 , u_3 выбрать другой момент t , такой, например, что $\omega t = 30^\circ$. Новая векторная диаграмма показана на рисунке 1.4 (б).

1.3 Сложение и вычитание синусоидальных величин

Преимущество изображения синусоидально изменяющихся величин векторами заключается в том, что при таком изображении сумма или разность нескольких величин может быть определена графически быстро и просто, в то время как при изображении величин синусоидами эти операции сложны и требуют много времени.

Допустим, необходимо сложить две ЭДС одной и той же частоты:

$$e_1 = E_{1m} \sin(\omega t + \psi_1), \quad e_2 = E_{2m} \sin(\omega t + \psi_2).$$

Мгновенное значение суммарной ЭДС равно алгебраической сумме мгновенных значений слагаемых величин: $e = e_1 + e_2 = E_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + E_{2m} \sin(\omega t + \psi_2)$. Сложение двух синусоидальных величин можно выполнить графически путем сложения двух синусоид, изображающих эти величины (т.е. с помощью временных диаграмм). Для получения ординат суммарной кривой нужно для каждого момента времени сложить ординаты кривых, изображающих слагаемые величины. В результате получим синусоидальную кривую той же частоты. Из чертежа можно определить амплитуду и начальную фазу суммарной ЭДС. Чем больше слагаемых величин, тем труднее выполнить вышеописанную операцию.

Докажем, что вектор, изображающий эту синусоиду, равен геометрической сумме векторов, изображающих синусоиды слагаемых величин. Чтобы сложить две заданные ЭДС e_1 и e_2 , представленные векторами E_{1m} и E_{2m} на рисунке 1.5, нужно вектор E_{2m} перенести параллельно самому себе так, чтобы его начало совпало с концом вектора E_{1m} (или вектор E_{1m} перенести параллельно самому себе, чтобы его начало совпало с концом вектора E_{2m}). Тогда замыкающий вектор E_m отобразит суммарную ЭДС.

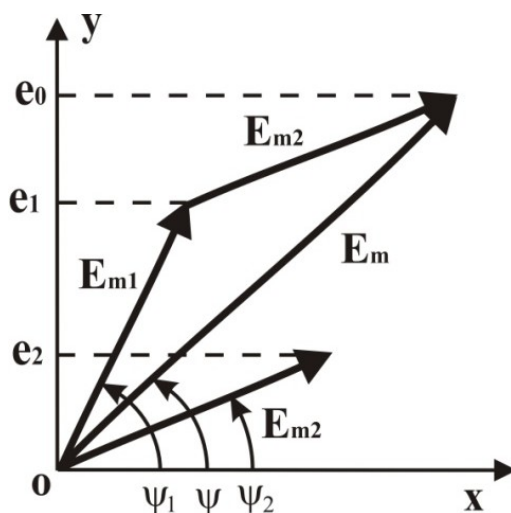


Рисунок 1.5 – Сложение двух векторов

Действительно, при $t=0$ проекция вектора E_{1m} на ось ординат представляет собой мгновенное значение e_1 , проекция вектора E_{2m} на ту же ось – мгновенное значение e_2 , а сумма этих проекций ($e_1 + e_2$) равна проекции на вертикальную ось суммарного вектора E_m (e). При вращении векторов их взаимное расположение не изменяется, и для проекций по-прежнему выполняется равенство $e = e_1 + e_2$.

Таким образом, **результатом сложения синусоидальных величин одинаковой частоты является синусоидальная величина той же частоты, амплитуда которой равна геометрической сумме амплитуд слагаемых синусоид.**

При большом числе векторов их сложение производится тем же методом, т.е. векторы переносятся параллельно самим себе так, чтобы каждый последующий вектор начинался в конце предыдущего. Замыкающий вектор (соединяющий начало первого вектора с концом последнего) изображает суммарную величину.

Вычитание двух синусоидальных величин заменяют сложением уменьшаемой величины с вычитаемой, взятой с обратным знаком, т.е.

$$e_1 - e_2 = e_1 + (-e_2)$$

Следует помнить, **что изменение знака у синусоидальной величины соответствует изменению начального фазового угла на 180° :**

$$-E_{2m} \sin(\omega t + \psi_2) = E_{2m} \sin(\omega t + \psi_2 \mp \pi) \quad (1.6)$$

Если синусоидальные величины изображены векторами, то изменение знака означает поворот вектора на $\mp 180^\circ$.

При сложении двух синусоидальных величин различной частоты получается несинусоидальная величина, которая не может изображаться вращающимся вектором. Векторная диаграмма применима только для синусоидальных величин, имеющих одну и ту же частоту.

1.4 Среднее и действующее значения токов

Для переменных токов, напряжений и ЭДС до сих пор мы пользовались двумя характеристиками их величин, а именно – мгновенными и максимальными значениями. В технике переменные токи, напряжения и ЭДС характеризуются еще средними и действующими (эффективными) значениями.

Среднее значение переменной синусоидальной величины за период равно, нулю. Поэтому, когда говорят о среднем значении синусоидальной величины, имеют в виду среднее значение за половину периода.

Среднее значение синусоидального тока (I_{cp}) за полупериод равно величине такого постоянного тока, при котором в течение полупериода через поперечное сечение проводника проходит то же количество электричества Q , что и при переменном токе.

$$I_{cp} = \frac{Q}{T/2} = \frac{\int_0^{T/2} i dt}{T/2} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} i dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} I_m \sin(\omega t) dt = \frac{2}{\pi} I_m \quad (1.7)$$

Следовательно, между средним и максимальными значениями синусоидального тока существует простое соотношение:

$$I_{cp} = \frac{2}{\pi} I_m \approx 0,637 I_m. \quad (1.8)$$

Аналогичные соотношения справедливы для напряжения и ЭДС.

Графическая связь между средним и амплитудными значениями за $T/2$ показана на рисунке 1.6. Построим прямоугольник с основанием $T/2$ и площадью, равной площади, заключенной между кривой и горизонтальной осью. Высота прямоугольника будет представлять среднее значение тока за полпериода.

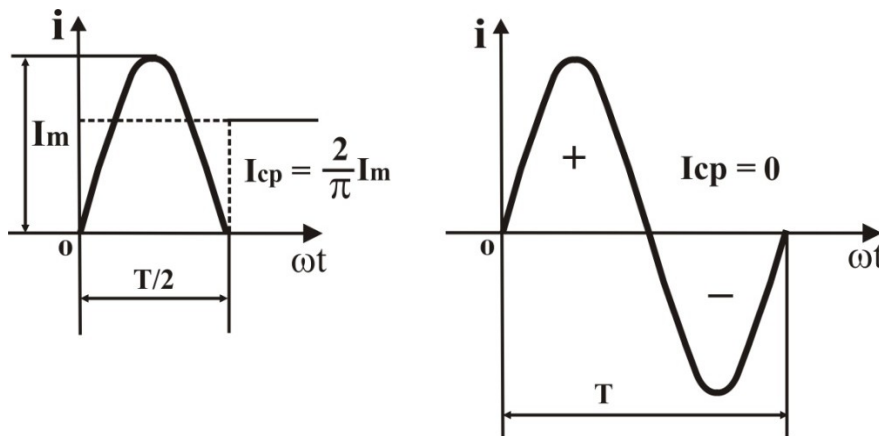


Рисунок 1.6 – Среднее значение синусоидального тока за половину периода $T/2$ и за период T

Для сравнения действий постоянного и переменного токов вводят понятие действующего значения переменного тока.

Действующее значение переменного тока численно равно такому постоянному току, при котором за время, равное одному периоду, в проводнике с сопротивлением R выделяется такое же количество тепловой энергии, как и при переменном токе.

Количество тепла, выделенное постоянным током в сопротивлении R за время, равное периоду переменного тока:

$$Q = I^2 RT.$$

Количество тепла, выделенное переменным током в том же сопротивлении за время dt :

$$dQ = i^2 R dt,$$

а за период T :

$$Q = \int_0^T dQ = \int_0^T i^2 R dt.$$

Приравнивая эти выражения получим:

$$I^2 RT = \int_0^T i^2 R dt \quad \text{или} \quad I^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt,$$

откуда действующее значение синусоидального тока $i = I_m \sin(\omega t)$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (I_m \sin(\omega t))^2 dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \approx 0,707 I_m \quad (1.9)$$

Такое же соотношение справедливо для действующих значений любых синусоидальных величин:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707 I_m; \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0,707 U_m; \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0,707 E_m \quad (1.10)$$

Действующие значения обозначаются прописными буквами без индекса, т.е. действующее значение тока – I , напряжения – U , ЭДС – E . Именно действующие значения тока или напряжения обычно указывают на шкалах измерительных приборов.

Так как действующие значения синусоидальных токов, напряжений и ЭДС пропорциональны амплитудным значениям этих величин, то вектор, выражающий в одном масштабе амплитудное значение, в другом масштабе представляет действующее значение той же величины. В дальнейшем при определении масштабов векторов мы будем иметь в виду их действующие значения.

1.5 Изображения синусоидальных функций комплексными числами

Развитие электротехники потребовало разработки инженерного метода расчета электрических цепей, позволяющего использовать уже хорошо известные приемы расчета сложных цепей постоянного тока для цепей переменного тока. Таким методом расчета стал **символический метод**, поскольку он основан на символическом изображении действительных синусоидальных функций времени комплексными числами.

Комплексное число \dot{A} изображается вектором на комплексной плоскости. Проекция этого вектора на действительную (горизонтальную) ось равна его действительной (Re) части $A \square$, а

проекция на мнимую (вертикальную) ось – мнимой (Im) части \dot{A} (рисунок 1.7).

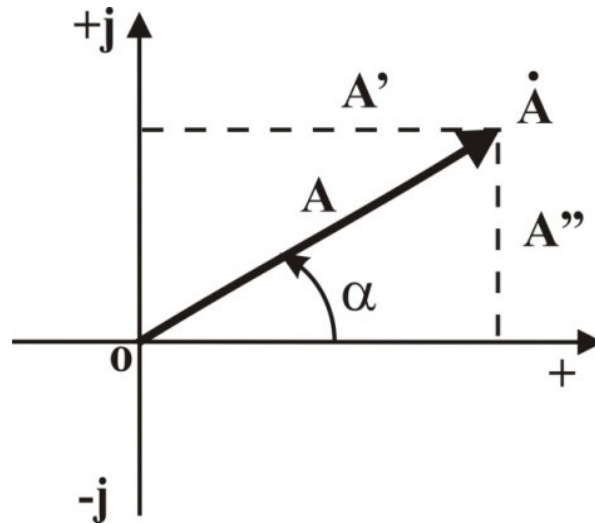


Рисунок 1.7 – Разложение вектора на составляющие

Положительные направления осей отметим знаками + и +j. Таким образом, в символической форме вектор \dot{A} будет:

$$\dot{A} = A' + j A'' \quad (1.11)$$

Причем, составляющая вектора по мнимой оси выделяется посредством особого множителя – символа $j = \sqrt{-1}$.

Если некоторый вектор \dot{U} , направленный по действительной оси, умножить на j, то вектор $j\dot{U}$ будет повернут относительно \dot{U} на 90° против часовой стрелки (т.е. в положительную сторону). Значит, мы тем самым рассматриваем число $j = \sqrt{-1} = e^{j\frac{\pi}{2}}$ как поворотный множитель, умножение на который равносильно повороту вектора (без изменения его длины) на угол 90° или $\pi/2$ в положительном направлении, т.е. против направления движения часовой стрелки. Повторное умножение на j соответствует повороту вектора \dot{U} на угол $\pi/2$ в положительном направлении, такой поворот эквивалентен перемене знака вектором: $j^2\dot{U} = -\dot{U}$. Третье умножение на j действительного числа дает отрицательное мнимое число: $j(j^2\dot{U}) = -j\dot{U}$, а вектор располагается вдоль отрицательной полуоси мнимых величин. Наконец, четвертый поворот возвращает вектор в исходное положение.

В зависимости от знаков чисел A' и A'' вектор \dot{A} может оказаться в любой четверти системы координат. Длина, или модуль вектора, не зависит от знаков чисел A' и A'' и определяется по теореме Пифагора, так как A' и A'' – катеты прямоугольного треугольника, а A – его гипотенуза (рисунок 1.7):

$$A = \sqrt{A'^2 + A''^2} \quad (1.12)$$

Угол α , образуемый вектором \dot{A} и действительной положительной полуосью, можно найти, учитывая положение вектора \dot{A} на комплексной плоскости:

I) Если вектор \dot{A} располагается в первой четверти комплексной плоскости, как на рисунке 1.8-I, т.е. $A' > 0$ и $A'' > 0$, то $\alpha = \arccos \frac{A'}{A}$

II) Если вектор \dot{A} располагается во второй четверти комплексной плоскости (рисунок 1.8-II), т.е. $A' < 0$ и $A'' > 0$, то угол α следует определять через сопряженный угол β : $\alpha = 180^\circ - \beta$, где $\beta = \arccos \frac{A'}{A}$

III) Если вектор \dot{A} располагается в третьей четверти комплексной плоскости (рисунок 1.8-III), т.е. $A' < 0$ и $A'' < 0$, то угол α определяют, как и во втором случае, через сопряженный угол β : $\alpha = -(180^\circ - \beta)$, где $\beta = \arccos \frac{A'}{A}$.

IV) Если же вектор \dot{A} расположен в четвертой четверти комплексной плоскости (рисунок 1.8-IV), т.е. $A' > 0$ и $A'' < 0$, то $\alpha = -\arccos \frac{A'}{A}$.

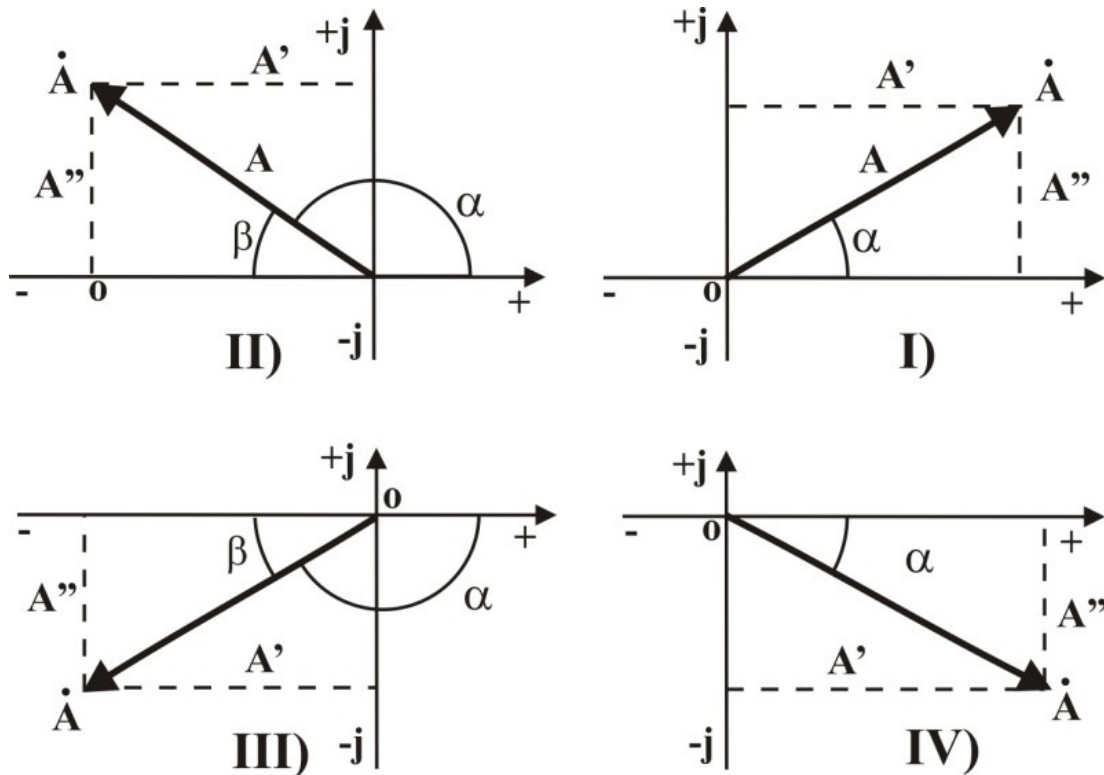


Рисунок 1.8 – Определение угла α

Угол α называется аргументом вектора \dot{A} . Следует помнить, что угол имеет положительный знак, если он отложен от действительной положительной полуоси в направлении,

противоположном ходу часовой стрелки. Отрицательный угол откладывается от действительной положительной полуоси по ходу часовой стрелки.

Таким образом, вектор, изображающий комплексное число, можно задать действительной и мнимой частями или значениями модуля и аргумента. При расчетах цепей применяют различные формы представления комплексных чисел:

1) алгебраическая форма: $\dot{A} = A' + j A''$.

2) тригонометрическая форма записи комплексного числа (образуется из алгебраической с учетом того, что $A' = A \cos \alpha$ и $A'' = A \sin \alpha$):

$$\dot{A} = A \cos \alpha + j A \sin \alpha = A(\cos \alpha + j \sin \alpha) \quad (1.13)$$

где A – длина, или модуль вектора;

α – аргумент вектора, или угол, образуемый вектором и действительной положительной полуосью.

3) показательная форма (на основании формулы Эйлера $e^{j\alpha} = \cos \alpha + j \sin \alpha$ тригонометрическую форму преобразуем в показательную):

$$\dot{A} = A e^{j\alpha} \quad (1.14)$$

Для сложения и вычитания комплексных чисел их следует представить в алгебраической форме. При этом сумма двух комплексных чисел есть комплексное число, действительная и мнимая части которого равны алгебраической сумме соответствующих частей слагаемых:

$$\begin{aligned} \dot{A} + \dot{B} &= (A' + jA'') + (B' + jB'') = (A' + B') + j(A'' + B'') = \\ &= C' + jC'' = \dot{C} \end{aligned} \quad (1.15)$$

Геометрически этому соответствует известное из векторной алгебры правило сложения векторов. Вычитание есть действие, обратное сложению, и аналитически выражает обычное геометрическое вычитание векторов:

$$\begin{aligned} \dot{A} - \dot{B} &= (A' + jA'') - (B' + jB'') = (A' - B') + j(A'' - B'') = \\ &= C' + jC'' = \dot{C} \end{aligned} \quad (1.16)$$

Умножение и деление комплексных величин, или, как говорят, комплексов, проще всего выполнить, когда они представлены в показательной форме. При умножении модули чисел перемножаются, а аргументы складываются. Рассмотрим несколько частных случаев:

1 Если один из комплексов – положительное действительное число $\dot{B} = b$, то в результате перемножения комплекса $\dot{A} = A e^{j\alpha}$ и числа

\mathbf{b} получится вектор, направленный вдоль вектора $\dot{\mathbf{A}}$ с модулем $A \cdot b$: $\dot{\mathbf{C}} = A b e^{j\alpha}$.

- 2 Если вектор $\dot{\mathbf{A}} = A e^{j\alpha}$ умножается на вектор $\dot{\mathbf{B}}$, модуль которого равен 1, т.е. на $e^{j\beta}$, то получается вектор $\dot{\mathbf{C}} = A e^{j(\alpha+\beta)}$ с модулем, равным модулю вектора $\dot{\mathbf{A}}$, но с аргументом, отличающимся на величину β .
- 3 Если сомножители имеют одинаковые модули и равные по величине, но противоположные по знаку аргументы, то их произведение равно квадрату модуля сомножителей:

$$\dot{\mathbf{C}} = A e^{j\alpha} \cdot A e^{-j\alpha} = A^2$$

Два таких комплекса называют **сопряженными** и обозначают:

$$\dot{\mathbf{A}} = A e^{j\alpha} \text{ и } \bar{\dot{\mathbf{A}}} = A e^{-j\alpha}.$$

Векторы, соответствующие сопряженным комплексам расположены зеркально относительно действительной оси, так как у сопряженных комплексов противоположные знаки аргументов.

- 4 Если произведение двух комплексов равно единице, то сомножителями являются комплексы: $\dot{\mathbf{A}} = A e^{j\alpha}$ и $\frac{1}{\dot{\mathbf{A}}} = \frac{1}{A} e^{-j\alpha}$, которые называются **обратными**.

Комплексные величины можно также дифференцировать и интегрировать. При дифференцировании j считают постоянным числом, таким образом, производная от комплексной величины $\dot{\mathbf{A}}$ определяется выражением:

$$\frac{d(\dot{\mathbf{A}})}{dt} = j\omega \dot{\mathbf{A}} \quad (1.17)$$

Геометрически дифференцирование сводится к повороту вектора $\omega \dot{\mathbf{A}}$ на угол 90° против часовой стрелки.

Интегрирование дает следующий результат:

$$\int \dot{\mathbf{A}} dt = \frac{\dot{\mathbf{A}}}{j\omega} = -j \frac{\dot{\mathbf{A}}}{\omega} \quad (1.18)$$

Этот результат говорит о том, что исходный вектор поворачивается на угол -90° (т.е. по ходу часовой стрелки), модуль вектора уменьшается в ω раз.

При расчете цепей переменного тока в качестве модуля вектора тока (или напряжения) выбирается действующее значение соответствующей величины. На комплексной плоскости действующее значение переменной величины изображается неподвижным вектором, например:

$$\dot{\mathbf{i}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j(\omega t + \psi_i)} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j\omega t} e^{j\psi_i} = I e^{j\psi_i}, \quad (1.19)$$

так как множитель $e^{j\omega t}$ принимают равным единице, т.е. рассматривают значения токов и напряжений в начальный момент времени $t=0$. В дальнейшем комплексные значения тока и напряжения будем для краткости именовать комплексными токами и напряжениями.

При построении векторной диаграммы на комплексной плоскости для одноименных величин (например, токов) выбирается единый масштаб, векторы других величин (напряжений, ЭДС) можно строить в других масштабах.

Строить вектор можно двумя способами:

- 1) определить положение точки на комплексной плоскости, используя значения мнимой и действительной части комплексного числа, и соединить найденную точку с началом координат;
- 2) отложить в положительном направлении (против часовой стрелки) от положительной вещественной полуоси угол, равный начальной фазе переменной величины. Из начала координат отложить под этим углом в принятом масштабе вектор переменной величины.

Символический метод является формальным переводом геометрических операций над векторами на язык комплексных чисел, вследствие чего все законы и методы расчета, полученные для цепей постоянного тока, могут применяться и для цепей переменного тока. Цепь постоянного тока можно рассматривать как частный случай цепей переменного тока.

ТЕМА 2 НЕРАЗВЕТВЛЕННЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

2.1 Общие положения

В цепи постоянного тока (при неизменном напряжении и сопротивлении) остаются неизменными: ток, мощность и запасенная в электрическом и магнитном полях энергия.

Процессы в цепях переменного тока существенно отличаются от явлений в цепях постоянного тока.

Переменное напряжение на зажимах электрической цепи создает в ней переменный ток. Магнитное поле переменного тока и запасенная в поле энергия изменяются, в цепи возникает ЭДС самоиндукции. В случае переменного напряжения изменяется и электрическое поле цепи, а, следовательно, запасенная в электрическом поле энергия.

Мощность цепи, характеризующая скорость превращения электрической энергии в тепловую, также изменяется в соответствии с изменением тока.

Электрическую цепь, при рассмотрении которой следует считаться и с преобразованием электрической энергии в тепловую, и с изменениями магнитного и электрического полей, характеризуют тремя параметрами:

- активным сопротивлением R ;
- индуктивностью L ;
- емкостью C .

В технике наряду с цепями, обладающими параметрами R , L и C , встречаются цепи, в которых преобладает один из этих параметров (R , L или C), тогда как другие параметры выявлены слабо и их влиянием можно пренебречь. Например, лампу накаливания, присоединенную к сети с частотой тока 50 Гц короткими соединительными проводами, можно рассматривать как сопротивление R , так как влияние емкости и индуктивности на процессы этой цепи ничтожно. То же можно сказать и о цепях с нагревательными приборами или реостатами. Цепь ненагруженного трансформатора во многих случаях можно рассматривать как индуктивность L . Кабель или кабельную сеть, работающие без нагрузки, часто можно рассматривать как емкость C (сопротивление и индуктивность этой цепи незначительны).

2.2 Цепь переменного тока с активным сопротивлением

В цепи переменного тока необратимые преобразования электромагнитной энергии в тепловую, световую, механическую, электрохимическую энергии обусловлены активными

сопротивлениями. Поэтому в широком смысле активным сопротивлением R следует считать не только сопротивление проводов, реостатов, обмоток катушек, но и любой приемник, поглощающий электромагнитную энергию. Активное сопротивление R равно отношению средней мощности, поглощаемой приемником, к квадрату значения действующего в нем тока:

$$R = P/I^2 \quad (2.1)$$

Умножение вектора тока \dot{I} на активное сопротивление R изменяет лишь величину вектора, но не его направление. Следовательно, **на участке цепи, содержащем только активное сопротивление, напряжение**

$$\dot{U}_R = R\dot{I} \quad (2.2)$$

и ток совпадают по фазе, а их векторы совпадают по направлению (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 – Активное сопротивление R в цепи переменного тока: изображение на схемах и векторная диаграмма.

2.3 Цепь переменного тока с индуктивностью

Рассмотрим цепь с индуктивностью L (рисунок 2.2). Предположим, что сопротивлением и емкостью цепи можно пренебречь. Под действием приложенного к цепи напряжения \dot{U} по цепи проходит переменный ток \dot{I} , который создает переменный магнитный поток $\dot{\Phi}$. Этот поток, изменяясь, наводит в цепи ЭДС самоиндукции:

$$e_L = -L \frac{di}{dt} \quad (2.3)$$

Вычисляя ЭДС через комплексное значение тока $\dot{I} = I_m e^{j(\omega t + \psi)}$, получаем комплексную ЭДС:

$$\dot{E}_L = -L \frac{d(\dot{I})}{dt} = -j\omega L \dot{I} \quad (2.4)$$

По второму закону Кирхгофа сумма приложенного к цепи напряжения источника питания и ЭДС равна нулю $u + e_L = 0$ (для мгновенных значений). Отсюда напряжение на зажимах цепи $u = -e_L$. Значит, эта ЭДС направлена навстречу приложенному напряжению и создает как бы сопротивление прохождению тока, т.е.

препятствует его изменению. Произведение $j\omega L$, имеющее размерность сопротивления [Ом], называют комплексным индуктивным сопротивлением. Индуктивное сопротивление есть только количественная оценка влияния ЭДС самоиндукции на ток в цепи при синусоидальном напряжении, чем оно принципиально и отличается от активного сопротивления. Иными словами, с помощью индуктивного сопротивления учитывается противодействие ЭДС самоиндукции изменениям переменного тока.

Умножение комплексного тока \dot{I} на индуктивное сопротивление

$$jx_L = j\omega L = j2\pi fL \quad (2.5)$$

не только изменяет длину вектора, но и поворачивает его на 90° в положительную сторону (против направления вращения часовой стрелки). Следовательно, **вектор падения напряжения на индуктивном сопротивлении опережает вектор тока на угол 90°** (рисунок 2.2):

$$\dot{U}_L = j\omega L \dot{I} \quad (2.6)$$



Рисунок 2.2 – Индуктивность L в цепи переменного тока: изображение на схемах и векторная диаграмма.

Таким образом, цепь с индуктивностью обладает сопротивлением (индуктивным), величина которого увеличивается с ростом частоты. При постоянном токе индуктивное сопротивление равно нулю. По этой причине многие аппараты и машины переменного тока нельзя включать под постоянное напряжение, так как в цепи постоянного тока их сопротивление относительно мало и сила постоянного тока может быть для них разрушительной (например, первичная обмотка трансформатора в радиоприемнике).

2.4 Цепь переменного тока с емкостью

Рассмотрим цепь переменного тока, которая обладает только емкостью (рисунок 2.3).

В цепи переменного тока конденсатор периодически заряжается и разряжается и в цепи протекает переменный ток. Если напряжение на конденсаторе изменяется по синусоидальному закону $\dot{U} = U_m e^{j\omega t}$, то ток в цепи

$$i_c = \frac{dq}{dt}; \quad \dot{i} = \frac{d(C\dot{U})}{dt} = j\omega C\dot{U} = -j \frac{\dot{U}}{X_C} = \dot{i}_m e^{j(\omega t + \frac{\pi}{2})} \quad (2.7)$$

Где: $X_C = -\frac{1}{\omega C}$ - Емкостное сопротивление (или реактивное сопротивление конденсатора) – количественная оценка влияния на ток переменного напряжения заряженного конденсатора.

Из выражения (2.7) следует, что **ток конденсатора опережает по фазе напряжение на нем на 90°** , или **напряжение на конденсаторе отстает по фазе от тока на 90°** (рис. 2.3)



Рисунок 2.3 – Емкость C в цепи переменного тока:
изображение на схемах и векторная диаграмма.

Реактивное сопротивление емкости обратно пропорционально частоте f и емкости C . При уменьшении частоты емкостное сопротивление увеличивается. А при $f=0$ (постоянное напряжение) $x_C = \infty$, т.е. постоянный ток через конденсатор не проходит (за исключением весьма малого тока утечки через диэлектрик, разделяющий обкладки конденсатора).

ТЕМА 3 РАСЧЕТ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ ЭЛЕМЕНТОВ

3.1 Основные соотношения

Рассмотрим цепь, изображенную на рисунке 3.1 и представляющую собой n последовательно соединенных элементов различного характера (активного, индуктивного, емкостного). К зажимам цепи приложено напряжение $u = U_m \sin \omega t$ (начальная фаза $\psi_U=0$). Согласно второму закону Кирхгофа напряжение на зажимах цепи равно сумме падений напряжений на элементах этой цепи (для мгновенных значений):

$$u = u_1 + u_2 + u_3 + \dots + u_n. \quad (3.1)$$

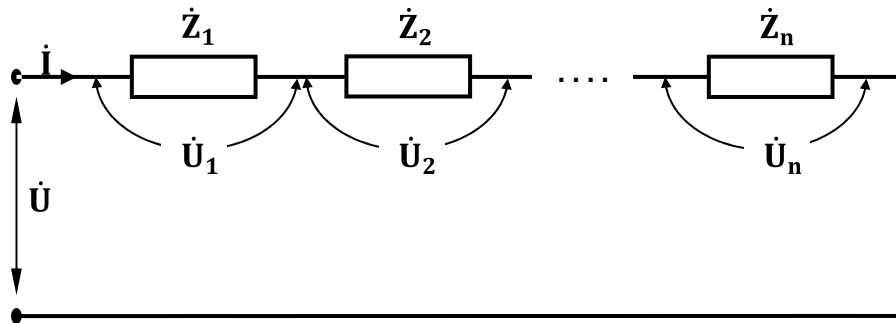


Рисунок 3.1 – Цепь с последовательным соединением приемников

Для действующих значений напряжений этот закон справедлив только в символической форме:

$$\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_3 + \dots + \dot{U}_n, \quad (3.2)$$

где $\dot{U}_i = U_i' \pm jU_i'' = R_i \dot{I} \pm jx_i \dot{I}$. Ток во всех точках неразветвленной цепи одинаков. Вынося его за скобки, получим:

$$\dot{U}_i = \dot{I}(R_i \pm jx_i) = \dot{I}\dot{Z}_i$$

Здесь знак «+» – для индуктивного характера нагрузки; «-» – для емкостного характера нагрузки.

В свою очередь \dot{Z}_i – полное сопротивление i -го элемента цепи в комплексной форме:

$$\dot{Z}_i = Z_i e^{\pm j\varphi_i}. \quad (3.3)$$

Модуль полного сопротивления i -го элемента определяется следующим образом:

$$Z_i = \sqrt{R_i^2 + x_i^2}, \quad (3.4)$$

а сдвиг по фазе между напряжением и током для i -го элемента цепи:

$$\varphi_i = \pm \arccos \frac{R_i}{Z_i} \quad (3.5)$$

Здесь также знак «+» – для индуктивного характера нагрузки; «-» – для емкостного характера нагрузки

Полное сопротивление всей цепи

$$\dot{Z} = \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dots + \dot{Z}_n = Ze^{\pm j\varphi} = R_3 \pm jx_3 \quad (3.6)$$

где R_3 – эквивалентное активное сопротивление всей цепи;

x_3 – эквивалентное реактивное сопротивление всей цепи.

$$R_3 = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n = \sum R_i \quad (3.7)$$

$$x_3 = \pm x_1 \pm x_2 \pm x_3 \pm \dots \pm x_n = \sum x_i^L - \sum x_i^C \quad (3.8)$$

где x_i^L – реактивные сопротивления катушек индуктивности,

x_i^C – реактивные сопротивления емкостных элементов.

Модуль полного сопротивления всей цепи определяется по формуле:

$$Z = \sqrt{R_3^2 + x_3^2} \quad (3.9)$$

а аргумент

$$\varphi = \pm \arccos \frac{R_3}{Z} = \arctg \frac{x_3}{R_3} \quad (3.10)$$

Ток в цепи, если задано напряжение \dot{U} , можно определить по закону Ома:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{\dot{Z}} = \frac{Ue^{j\psi_U}}{Ze^{j\varphi}} = Ie^{j(\psi_U - \varphi)} \quad (3.11)$$

ψ_U - начальная фаза напряжения. Если $\psi_U = 0$, $\dot{I} = Ie^{-j\varphi}$

Если же задан ток в цепи, то напряжение, приложенное к зажимам цепи:

$$\dot{U} = \dot{I}\dot{Z} = Ie^{j\psi_I} \cdot Ze^{j\varphi} = Ue^{j(\psi_I + \varphi)} \quad (3.12)$$

ψ_I - начальная фаза тока. Если $\psi_I = 0$, $\dot{U} = Ue^{j\varphi}$

Полная мощность всей цепи рассчитывается по формуле (единица измерения [ВА]):

$$\dot{S} = \dot{U}\bar{I} = Ue^{\pm j\varphi} = UI \cos \varphi \pm jUI \sin \varphi = P \pm jQ \quad (3.13)$$

где \bar{I} – комплексное сопряженное значение тока.

В нашем случае $\dot{I} = Ie^{-j\varphi}$, следовательно, $\bar{I} = Ie^{j\varphi}$;

P – активная мощность всей цепи [Вт];

Q – реактивная мощность всей цепи [ВАр].

В формулах (39), (40), (41) необходимо учитывать знаки углов сдвига фаз ψ_U , ψ_I , φ .

3.2 Пример решения задачи

Задание для расчета:

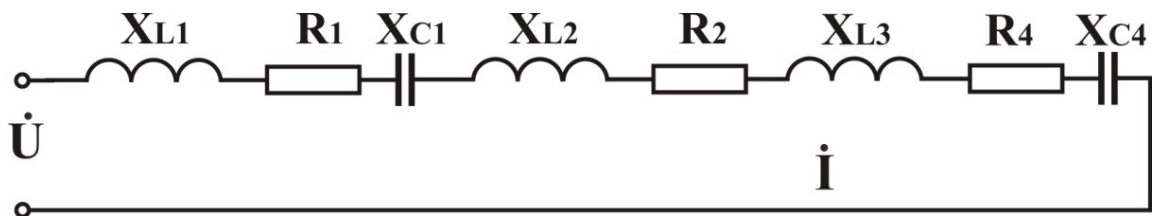
1. Нарисовать схему соединения для своего варианта задания.
2. Найти полное сопротивление цепи \dot{Z} .
3. Определить действующее значение тока в цепи.
4. Найти падение напряжения на каждом элементе схемы.
5. Найти приложенное напряжение \dot{U} .
6. Построить векторную диаграмму (в масштабе).
7. Определить активную, реактивную и полную мощность всей цепи.
8. Изменить параметры элементов схемы так, чтобы в цепи возник резонанс напряжений.
9. Качественно построить векторную диаграмму при резонансе (изменив соответствующим образом длину векторов реактивных напряжений).

Пример расчета:

Таблица 1 - Исходные данные:

| № вар. | U В | X _{L1} Ом | R ₁ Ом | X _{C1} Ом | X _{L2} Ом | R ₂ Ом | X _{C2} Ом | X _{L3} Ом | R ₃ Ом | X _{C3} Ом | X _{L4} Ом | R ₄ Ом | X _{C4} Ом |
|--------|-----|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| 0 | 100 | 5 | 2 | 4 | 2 | 4 | нет | 1 | нет | нет | нет | 2 | 10 |

1. Схема соединения в соответствии с исходными данными



2. Полное сопротивление всей цепи

$$\dot{Z} = \sum R + j(\sum X_L - \sum X_C) = (R_1 + R_2 + R_3) + j(X_{L1} + X_{L2} + X_{L3} - X_{C1} - X_{C4}) = (2 + 4 + 2) + j(5 + 2 + 1 - 4 - 10) = 8 - j6 = 10e^{-j37} \text{ Ом}$$

3. Действующее значение тока в цепи

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

4. Направим вектор тока по вещественной оси $\dot{I} = Ie^{j0}$.

5. Падение напряжения на отдельных элементах схемы

$$\dot{U}_{XL1} = jX_{L1} \dot{I} = j5 \cdot 10 = 50e^{j90} \text{ В}$$

$$\dot{U}_{R1} = R_1 \dot{I} = 2 \cdot 10 = 20e^{j0} \text{ В}$$

$$\dot{U}_{C1} = -jX_{C1} \dot{I} = -j4 \cdot 10 = 40e^{-j90} \text{ В}$$

аналогично находим \dot{U}_{XL2} , \dot{U}_{R2} , \dot{U}_{XL3} , \dot{U}_{R4} , \dot{U}_{XC4}

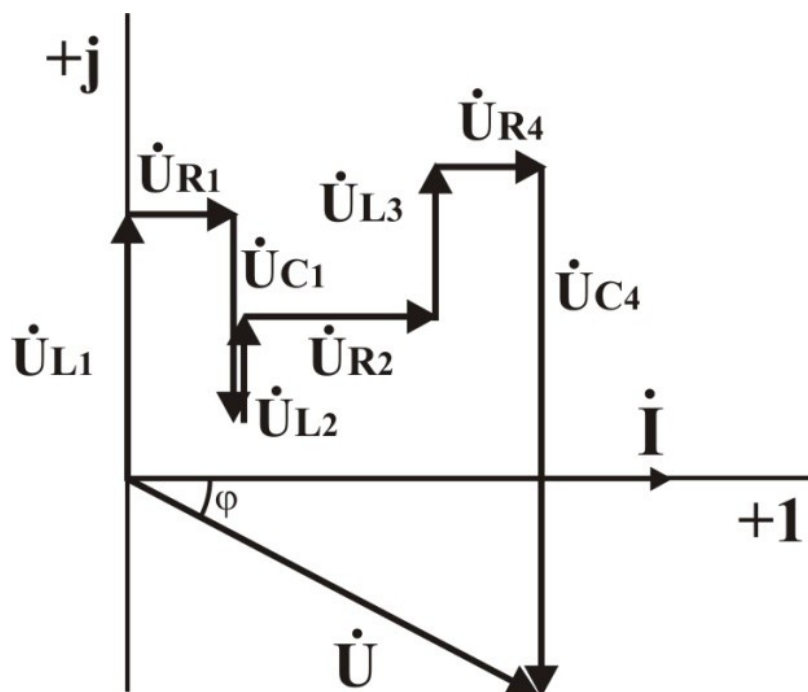
6. Приложенное к цепи напряжение (II закон Кирхгофа)

$$\begin{aligned} \dot{U} &= \sum \dot{U}_i = \dot{U}_{L1} + \dot{U}_{R1} + \dot{U}_{C1} + \dot{U}_{L2} + \dot{U}_{R2} + \dot{U}_{L3} + \dot{U}_{R4} + \dot{U}_{C4} = \\ &= j50 + 20 - j40 + j20 + 40 + j10 + 20 - j100 = 80 - j60 = 100e^{-j37} \text{ В} \end{aligned}$$

7. Построение векторной диаграммы в масштабе.

Строим векторную диаграмму, выбрав предварительно масштаб напряжения и направив вектор тока по вещественной оси: $\dot{I} = Ie^{j0}$.

Строим вектор напряжения на первом приемнике \dot{U}_{XL1} . Из конца этого вектора строим вектор напряжения на втором приемнике \dot{U}_{R1} и т.д. В результате получим векторную сумму напряжений на всех элементах схемы, т.е. приложенное напряжение \dot{U} – это вектор, проведенный из начала вектора первого напряжения в конец последнего.



8. Мощность всей цепи

$$\dot{S} = \dot{U} \bar{I} = 100e^{-j37} \cdot 10e^{j0} = 1000e^{-j37} = 800 - j600 .$$

Следовательно, полная мощность $S=1000 \text{ ВА}$;

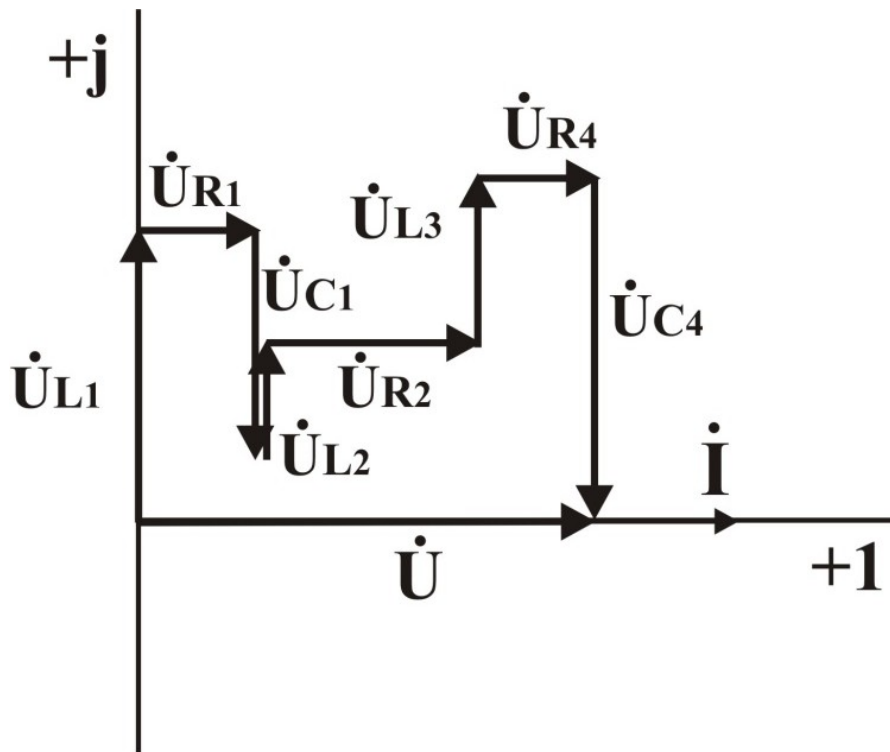
активная мощность $P=800 \text{ Вт}$;

реактивная мощность $Q= - 600 \text{ ВАр}$.

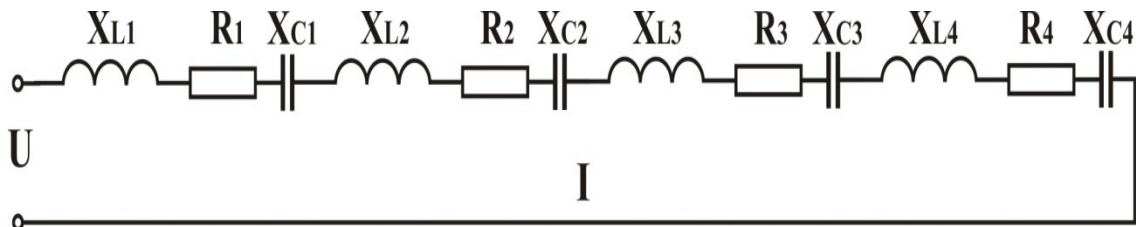
9. Изменяем схему, чтобы получить резонанс напряжений.

При заданных параметрах в цепи преобладает емкостное сопротивление ($X_{\Sigma} = (\sum X_L - \sum X_C) = -6 \text{ Ом}$). Чтобы обеспечить выполнение условия резонанса ($\sum X_L = \sum X_C$), нужно либо увеличить на 6 Ом индуктивное сопротивление цепи, либо уменьшить на 6 Ом емкостное сопротивление.

Увеличим емкость конденсатора C_4 так, чтобы X_{C4} было равно 4 Ом. Тогда $\sum X_L - \sum X_C = 0$, следовательно, в цепи резонанс напряжений. Векторная диаграмма при резонансе будет иметь вид.



3.3 Варианты заданий для расчета цепи с последовательным соединением приемников (в различных вариантах задания отдельные элементы цепи могут отсутствовать).



**Таблица 2 - Варианты заданий для расчета цепи с
последовательным соединением приемников
(Задание для расчета приведено на стр. 27)**

| № вар. | U В | X_{L1} Ом | R₁ Ом | X_{C1} Ом | X_{L2} Ом | R₂ Ом | X_{C2} Ом | X_{L3} Ом | R₃ Ом | X_{C3} Ом | X_{L4} Ом | R₄ Ом | X_{C4} Ом |
|-------------------|----------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 1 | 100 | 4 | 3 | нет | нет | 2 | 10 | 4 | нет | нет | 8 | 3 | нет |
| 2 | 100 | нет | 1 | 10 | нет | 2 | 2 | 9 | 3 | нет | нет | нет | 5 |
| 3 | 100 | нет | 3 | 2 | 5 | 2 | нет | нет | 1 | 5 | 8 | 2 | нет |
| 4 | 100 | нет | 2 | 5 | 7 | 1 | нет | нет | 3 | 2 | нет | нет | 8 |
| 5 | 100 | 7 | 2 | нет | 4 | 4 | нет | нет | 2 | 10 | 5 | нет | нет |
| 6 | 100 | 5 | 3 | нет | нет | 2 | 2 | 4 | нет | 5 | нет | 3 | 8 |
| 7 | 100 | 6 | 4 | нет | 4 | 2 | нет | нет | нет | 4 | 2 | нет | нет |
| 8 | 100 | 8 | 1 | нет | нет | 2 | 2 | нет | нет | 9 | нет | 3 | 5 |
| 9 | 100 | 7 | 6 | нет | нет | 2 | 2 | нет | нет | 4 | 5 | нет | нет |
| 10 | 100 | нет | 2 | 4 | 6 | 2 | нет | нет | нет | 8 | нет | 2 | 2 |
| 11 | 100 | 8 | 2 | нет | нет | 2 | 10 | 4 | нет | нет | 6 | 2 | нет |
| 12 | 100 | нет | 4 | 2 | нет | 2 | 4 | 10 | 2 | нет | нет | нет | 10 |
| 13 | 100 | 5 | 2 | нет | нет | 1 | 2 | 3 | нет | 4 | 6 | 3 | нет |
| 14 | 100 | нет | 2 | 10 | 8 | 1 | нет | 4 | 5 | нет | нет | нет | 8 |
| 15 | 100 | 4 | 2 | нет | 5 | 1 | нет | нет | нет | 10 | 7 | 5 | нет |
| 16 | 100 | 3 | 2 | 5 | нет | 2 | нет | 2 | нет | нет | 8 | 2 | нет |
| 17 | 100 | нет | 1 | 5 | 6 | 2 | 5 | 3 | 3 | нет | нет | 2 | 5 |
| 18 | 100 | нет | 4 | 2 | 5 | 2 | нет | 8 | 1 | 5 | нет | 1 | нет |
| 19 | 100 | нет | 2 | 5 | 7 | 1 | нет | нет | нет | 4 | нет | 3 | 6 |
| 20 | 100 | 7 | 2 | нет | 4 | 4 | 4 | нет | 2 | 6 | 5 | нет | нет |
| 21 | 100 | 5 | 3 | 4 | нет | 2 | 2 | 4 | нет | 5 | нет | 3 | 4 |
| 22 | 100 | 4 | 4 | нет | 4 | 2 | нет | 2 | нет | 4 | 2 | нет | нет |
| 23 | 100 | 8 | 1 | 4 | нет | 2 | 2 | нет | нет | 5 | нет | 3 | 5 |
| 24 | 100 | 4 | 6 | нет | 3 | 2 | 2 | нет | нет | 4 | 5 | нет | нет |
| 25 | 100 | нет | 2 | 4 | 4 | 2 | нет | 2 | нет | 8 | нет | 2 | 2 |
| 26 | 100 | 8 | 2 | 4 | нет | 2 | 6 | 4 | нет | нет | 6 | 2 | нет |
| 27 | 100 | нет | 4 | 5 | нет | 2 | 4 | 5 | 2 | нет | 5 | нет | 7 |
| 28 | 100 | 5 | 2 | нет | 3 | 1 | 2 | 3 | нет | 4 | 3 | 3 | нет |
| 29 | 100 | нет | 2 | 10 | 4 | 1 | нет | 4 | 5 | нет | 4 | нет | 8 |
| 30 | 100 | 4 | 2 | нет | 5 | 1 | нет | 4 | нет | 10 | 3 | 5 | нет |

ТЕМА 4 РАЗВЕТВЛЕННЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

4.1 Расчет цепи переменного тока при параллельном соединении элементов

Расчет параллельной цепи переменного тока основан на первом законе Кирхгофа.

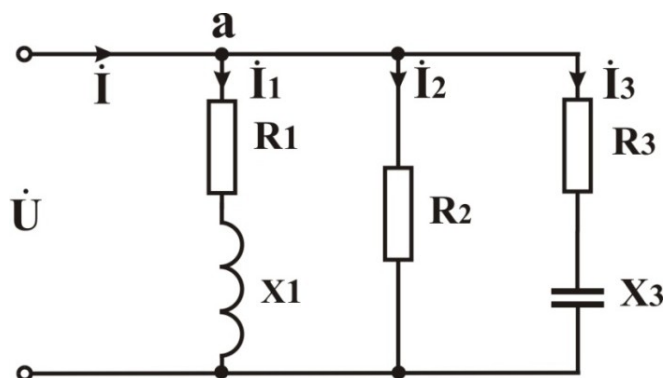


Рисунок 4.1 – Параллельная цепь переменного тока

Если известно приложенное напряжение \dot{U} и сопротивление элементов схемы, то можно найти токи в ветвях \dot{I}_1 , \dot{I}_2 и \dot{I}_3 .

$$\text{Ток первой ветви } \dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{\dot{Z}_1} \quad (4.1)$$

Где \dot{Z}_1 – полное сопротивление первой ветви

$$\dot{Z}_i = \sqrt{R_i^2 + X_i^2} \cdot e^{j\varphi_i}; \quad \varphi_i = \arccos \frac{R_i}{Z_i}$$

Аналогично можно определить токи остальных ветвей.

На основании первого закона Кирхгофа для точки «а» определяем ток в неразветвленной части цепи

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 \quad (4.2)$$

4.2 Пример решения задачи

Задание для расчета:

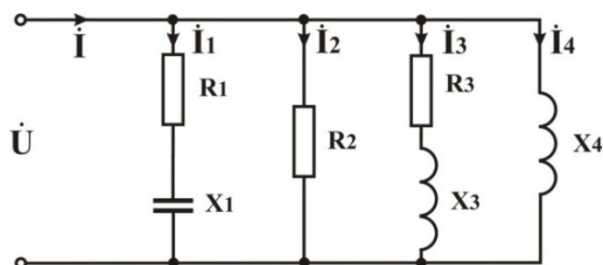
1. Нарисовать схему соединения для своего варианта задания
2. Найти полное сопротивление каждой ветви
3. Определить токи в ветвях и ток в неразветвленной части цепи.
4. Определить активную, реактивную и полную мощности всей цепи и первой ветви.
5. Построить в масштабе векторную диаграмму (ВД) и определить ток в неразветвленной части цепи по ВД.

Пример расчета:

Таблица 3 - Исходные данные:

| № вар. | U В | R ₁ Ом | X _{L1} Ом | X _{C1} Ом | R ₂ Ом | X _{L2} Ом | X _{C2} Ом | R ₃ Ом | X _{L3} Ом | X _{C3} Ом | R ₄ Ом | X _{L4} Ом | X _{C4} Ом |
|--------|-----|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| 0 | 100 | 8 | нет | 6 | 10 | нет | нет | 6 | 8 | нет | нет | 10 | нет |

1. Схема соединения в соответствии с исходными данными



2. Полное сопротивление отдельной ветви

$$\dot{Z}_i = \sqrt{R_i^2 + X_i^2} \cdot e^{j\varphi_i}; \varphi_i = \arccos \frac{R_i}{Z_i}$$

Тогда полное сопротивление каждой из ветвей:

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2} = \sqrt{8^2 + 6^2} = 10 \text{ Ом}; \varphi_1 = \arccos \frac{R_1}{Z_1} = \arccos 0.8 = -37^\circ$$

$$\dot{Z}_1 = Z_1 \cdot e^{j\varphi_1} = 10e^{-j37^\circ} \text{ Ом}$$

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2} = \sqrt{10^2 + 0} = 10 \text{ Ом}; \varphi_2 = \arccos \frac{R_2}{Z_2} = \arccos 1 = 0^\circ$$

$$\dot{Z}_2 = Z_2 \cdot e^{j\varphi_2} = 10e^{j0^\circ} \text{ Ом}$$

$$Z_3 = \sqrt{R_3^2 + X_3^2} = \sqrt{6^2 + 8^2} = 10 \text{ Ом}; \varphi_3 = \arccos \frac{R_3}{Z_3} = \arccos 0.6 = 53^\circ$$

$$\dot{Z}_3 = Z_3 \cdot e^{j\varphi_3} = 10e^{j53^\circ} \text{ Ом}$$

$$Z_4 = \sqrt{R_4^2 + X_4^2} = \sqrt{0 + 10^2} = 10 \text{ Ом}; \varphi_4 = \arccos \frac{R_4}{Z_4} = \arccos 0 = 90^\circ$$

$$\dot{Z}_4 = Z_4 \cdot e^{j\varphi_4} = 10e^{j90^\circ} \text{ Ом}$$

3. Токи в ветвях и ток в неразветвленной части цепи

Направим вектор напряжения по действительной оси: $\dot{U} = 100e^{j0}$, тогда

$$\dot{\mathbf{I}}_1 = \frac{\dot{\mathbf{U}}}{\dot{\mathbf{Z}}_1} = \frac{100e^{j0}}{10e^{-j37}} = 10e^{j37} = 8 + j6 \text{ A};$$

$$\dot{\mathbf{I}}_2 = \frac{\dot{\mathbf{U}}}{\dot{\mathbf{Z}}_2} = \frac{100e^{j0}}{10e^{j0}} = 10e^{j0} = 10 - j0 \text{ A};$$

$$\dot{\mathbf{I}}_3 = \frac{\dot{\mathbf{U}}}{\dot{\mathbf{Z}}_3} = \frac{100e^{j0}}{10e^{j53}} = 10e^{-j53} = 6 - j8 \text{ A};$$

$$\dot{\mathbf{I}}_4 = \frac{\dot{\mathbf{U}}}{\dot{\mathbf{Z}}_4} = \frac{100e^{j0}}{10e^{j90}} = 10e^{-j90} = 0 - j10 \text{ A};$$

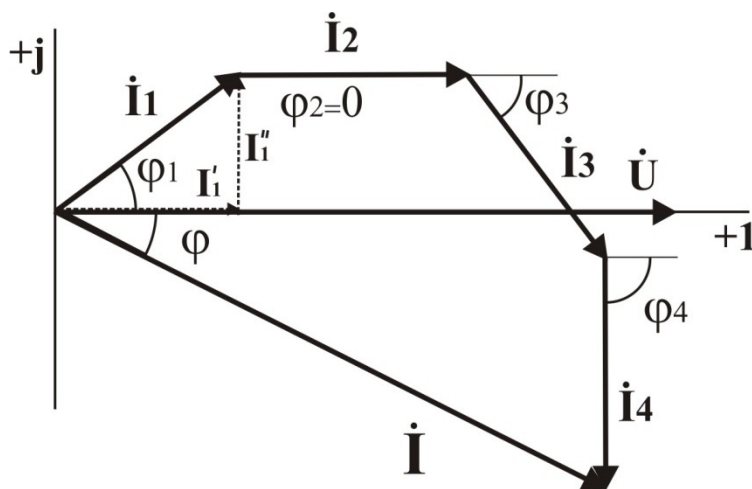
$$\dot{\mathbf{I}} = \dot{\mathbf{I}}_1 + \dot{\mathbf{I}}_2 + \dot{\mathbf{I}}_3 + \dot{\mathbf{I}}_4 = 8 + j6 + 10 + 6 - j8 + 0 - j10 = 24 - j12 = 26.8e^{-j26.6}.$$

4. Мощность всей цепи

$$\dot{\mathbf{S}} = \dot{\mathbf{U}}\dot{\mathbf{I}} = 100e^{j0} \cdot 26.8e^{j26.6} = 2680e^{j26.6} = 2400 + j1200.$$

Следовательно, $S=2680$ ВА; $P=2400$ Вт; $Q=1200$ ВАр.

5. Строим векторную диаграмму, выбрав предварительно масштаб тока и направив вектор напряжения по вещественной оси: $\dot{\mathbf{U}} = 100e^{j0}$. Строим вектор тока $\dot{\mathbf{I}}_1$ по его вещественной и мнимой составляющим I_1' и I_1'' . Из конца этого вектора аналогично строим вектор тока $\dot{\mathbf{I}}_2$ и т.д. В результате получим векторную сумму токов всех ветвей, т.е. ток в неразветвленной части цепи $\dot{\mathbf{I}}$ – это вектор, проведенный из начала вектора первого тока в конец последнего.



**Таблица 4 - Варианты заданий для расчета цепи с
параллельным соединением приемников
(Задание для расчета приведено на стр. 31)**

| № вар. | U В | R₁ Ом | X_{L1} Ом | X_{C1} Ом | R₂ Ом | X_{L2} Ом | X_{C2} Ом | R₃ Ом | X_{L3} Ом | X_{C3} Ом | R₄ Ом | X_{L4} Ом | X_{C4} Ом |
|-------------------|----------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1 | 10 | 3 | 4 | нет | 10 | нет | нет | 6 | нет | 8 | нет | нет | 5 |
| 2 | 100 | 10 | нет | нет | 4 | 3 | нет | 8 | нет | 6 | нет | нет | 5 |
| 3 | 10 | нет | нет | 5 | 6 | 8 | нет | 10 | нет | нет | нет | 5 | нет |
| 4 | 100 | 4 | нет | 3 | 10 | нет | нет | 6 | 8 | нет | нет | 5 | нет |
| 5 | 10 | нет | 5 | нет | 6 | нет | 8 | 10 | нет | нет | нет | нет | 10 |
| 6 | 100 | 3 | 4 | нет | 8 | нет | 6 | 10 | нет | нет | нет | 5 | нет |
| 7 | 10 | 10 | нет | нет | нет | нет | 5 | 6 | 8 | нет | нет | 10 | нет |
| 8 | 100 | нет | нет | 10 | 3 | нет | 4 | 10 | нет | нет | 4 | 3 | нет |
| 9 | 10 | 8 | нет | 6 | 3 | 4 | нет | 10 | нет | нет | нет | нет | 10 |
| 10 | 100 | нет | 10 | нет | 6 | 8 | нет | 10 | нет | нет | 4 | нет | 3 |
| 11 | 10 | 8 | 6 | нет | нет | нет | 10 | 10 | нет | нет | нет | 5 | нет |
| 12 | 100 | 10 | нет | нет | нет | 10 | нет | 3 | нет | 4 | 8 | 6 | нет |
| 13 | 10 | нет | нет | 10 | 10 | нет | нет | 6 | 8 | нет | нет | 5 | нет |
| 14 | 100 | 6 | нет | 8 | нет | 5 | нет | 10 | нет | нет | 8 | нет | 6 |
| 15 | 10 | нет | 10 | нет | 10 | нет | нет | 6 | нет | 8 | нет | нет | 5 |
| 16 | 100 | 8 | 6 | нет | нет | 10 | нет | 10 | нет | нет | 4 | нет | 3 |
| 17 | 10 | 10 | нет | нет | 3 | нет | 4 | нет | нет | 5 | 4 | 3 | нет |
| 18 | 100 | нет | нет | 10 | 6 | нет | 8 | 8 | 6 | нет | нет | 5 | нет |
| 19 | 10 | 4 | нет | 3 | нет | нет | 10 | 10 | нет | нет | 4 | 3 | нет |
| 20 | 100 | нет | 5 | нет | 6 | 8 | нет | 4 | нет | 3 | нет | нет | 5 |
| 21 | 10 | 6 | 8 | нет | 8 | нет | 6 | 10 | нет | нет | нет | 10 | нет |
| 22 | 100 | 10 | нет | нет | 3 | нет | 4 | нет | 5 | нет | 6 | 8 | нет |
| 23 | 10 | нет | нет | 10 | 4 | нет | 3 | нет | 10 | нет | 3 | 4 | нет |
| 24 | 100 | 6 | нет | 8 | 4 | 3 | нет | 5 | нет | нет | нет | нет | 10 |
| 25 | 10 | нет | 5 | нет | 6 | 8 | нет | нет | нет | 10 | 3 | нет | 4 |
| 26 | 100 | 8 | 6 | нет | 10 | нет | нет | нет | 5 | нет | 4 | нет | 3 |
| 27 | 10 | 10 | нет | нет | нет | нет | 5 | 6 | нет | 8 | 4 | 3 | нет |
| 28 | 100 | нет | нет | 5 | 10 | нет | нет | 4 | нет | 3 | 6 | 8 | нет |
| 29 | 10 | 8 | нет | 6 | 10 | нет | нет | нет | нет | 5 | 4 | 3 | нет |
| 30 | 100 | нет | 5 | нет | 10 | нет | нет | 6 | 8 | нет | 4 | нет | 3 |

ТЕМА 5 ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ

5.1 Основные понятия и определения

Трехфазная система, изобретенная выдающимся русским инженером М.О. Доливо-Добровольским в 80-х годах XIX столетия, применяется во всем мире для передачи и распределения электрической энергии. Она обеспечивает наиболее экономичную передачу энергии и позволяет создать надежные в работе и простые по устройству электродвигатели, генераторы и трансформаторы.

Источником энергии для трехфазной системы служит трехфазный синхронный генератор. Простейший генератор трехфазного тока по конструкции аналогичен генератору однофазного тока, только его статор имеет не одну, а три обмотки, сдвинутые в пространстве друг относительно друга на 120° . При вращении якоря, представляющего собой электромагнит, в этих обмотках наводятся ЭДС одинаковой частоты, но имеющие разные фазы (фазные углы). Если амплитуды ЭДС трех обмоток генератора равны друг другу, а сдвиг фаз между двумя любыми смежными ЭДС равен 120° , то **трехфазная система ЭДС называется симметричной.**

Отдельные обмотки трехфазного генератора называют фазами (фаза А, фаза В, фаза С). Это понятие не следует путать с фазой синусоидально изменяющейся величины, т.е. с ее фазным углом. Приняв начало отсчета времени ($t=0$) совпадающим с моментом, когда ЭДС первой фазы проходит через нулевое значение, запишем ЭДС в фазах генератора:

$$\begin{cases} e_A = E_m \sin \omega t; \\ e_B = E_m \sin(\omega t - \frac{2}{3} \pi); \\ e_C = E_m \sin(\omega t + \frac{2}{3} \pi). \end{cases} \quad (5.1)$$

В символической форме три вектора ЭДС трехфазной симметричной системы можно выразить через одинаковое для всех трех фаз значение фазной ЭДС E_ϕ и соответствующий комплексный множитель, при этом **вектор ЭДС фазы А считаем направленным по вещественной оси:**

$$\begin{aligned} \dot{E}_A &= E_\phi e^{j0}; \\ \dot{E}_B &= E_\phi e^{-j\frac{2\pi}{3}}; \\ \dot{E}_C &= E_\phi e^{+j\frac{2\pi}{3}}. \end{aligned} \quad (5.2)$$

Сумма этих трех векторов изображается замкнутым треугольником, значит, $\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0$.

Один из зажимов каждой обмотки генератора называют началом фазы и обозначают соответственно буквами А, В и С. Другой зажим каждой обмотки называют концом и обозначают соответственно буквами X, Y и Z. Положительные направления ЭДС в обмотках генератора принято выбирать от концов фаз к началам.

Существует два основных способа соединения трехфазной системы – это соединения по схеме «звезда» и «треугольник». Рассмотрим случай, когда обмотки генератора соединены по схеме «звезда». При таком способе соединения фаз генератора концы обмоток X, Y и Z соединены в одну общую точку **О**, которую называют **нулевой точкой** или **нейтралью генератора**. С приемником энергии генератор соединяется тремя или четырьмя проводами. Три из них, подсоединенные к началам обмоток (точки А, В, С), называются линейными. Четвертый провод, подсоединенный к нулевой точке, называют **нейтральным** или **нулевым** (рис. 5.1).

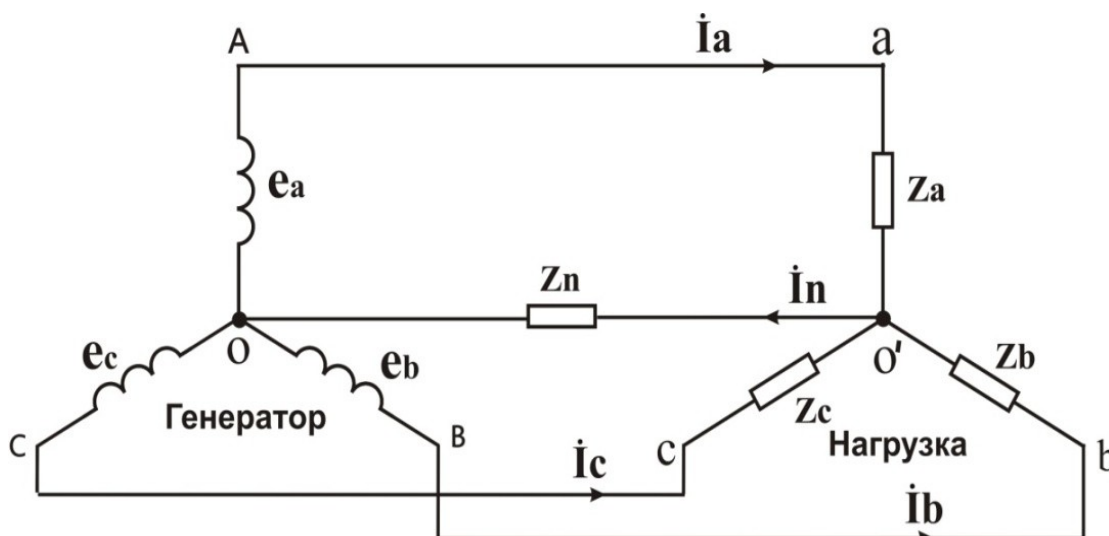


Рисунок 5.1 - Схема соединения обмоток генератора и нагрузки по схеме «звезда» с нейтральным проводом.

Напряжения между линейными проводами (т.е. между началами обмоток генератора) принято называть **линейными** и обозначать \dot{U}_{AB} , \dot{U}_{BC} , \dot{U}_{CA} или \dot{U}_L .

Напряжение между соответствующим линейным и нейтральным проводами (т.е. между началами и концами обмоток) называют **фазным напряжением** и обозначают \dot{U}_A , \dot{U}_B , \dot{U}_C или \dot{U}_ϕ .

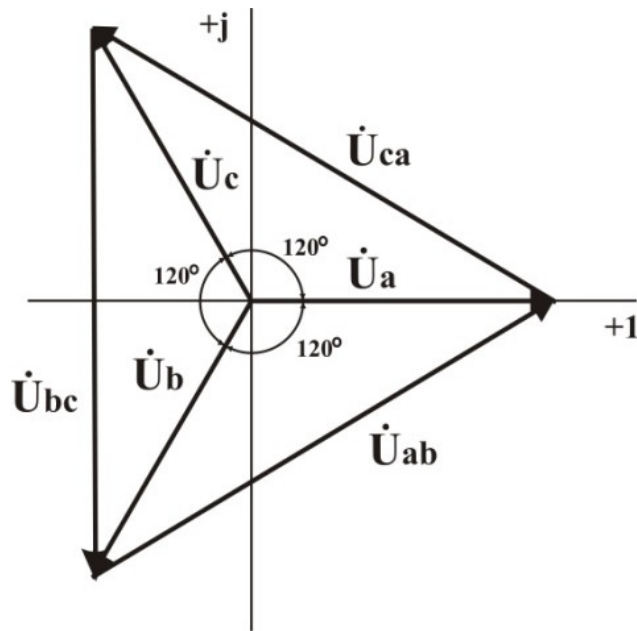


Рисунок 5.2 Векторная диаграмма линейных и фазных напряжений.

Векторы линейных напряжений \dot{U}_{AB} ; \dot{U}_{BC} ; \dot{U}_{CA} на векторной диаграмме всегда образуют замкнутый треугольник, так как их сумма тождественно равна нулю (рис. 5.2). Если напряжения выразить комплексными величинами, то комплексное линейное напряжение определяется как разность соответствующих комплексных фазных напряжений:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B; \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C; \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A \quad (5.3)$$

Из векторной диаграммы на рисунке 5.2 видно, что и векторы двух соседних фазных напряжений вместе с вектором соответствующего линейного напряжения образуют замкнутый треугольник. При симметричной системе ЭДС фазные напряжения равны, а угол между ними равен 120° . Следовательно, по теореме косинусов, действующее значение линейного напряжения можно выразить через два фазных.

Например, $U_{AB} = \sqrt{U_a^2 + U_b^2 - 2U_a U_b \cos 120^\circ} = \sqrt{3} U_\phi$ т.е. **линейное напряжение в $\sqrt{3} \approx 1,73$ раза больше фазного:**

$$U_l = \sqrt{3} U_\phi \quad (5.4)$$

Приемники энергии, также как и обмотки генератора, можно соединить «звездой». У приемника, также как и у генератора, существуют фазы a, b и c; нулевая точка - O'. В фазах приемника текут фазные токи \dot{I}_a , \dot{I}_b , \dot{I}_c , которые равны соответствующим линейным токам \dot{I}_A , \dot{I}_B , \dot{I}_C , т.е. токам, протекающим в линейных проводах (рис. 5.1).

Напряжения на фазах приемника (участки цепи а - О' , b - О' , с - О') называются фазными и обозначаются \dot{U}_a' , \dot{U}_b' , \dot{U}_c' .

Одинаковая нагрузка всех трех фаз приемника (как по номинальному значению, так и по характеру) называется **симметричной или равномерной**. В этом случае сила тока во всех фазах одинакова и одинаковы сдвиги фаз между фазными напряжениями и токами.

Трехфазную цепь при соединении «звезда»-«звезда» можно рассматривать как сложную цепь с двумя узлами: О – нулевая точка генератора и О' – нулевая точка приемника. Воспользовавшись методом узлового напряжения, можно определить напряжение между нейтралью приемника энергии О' и нейтралью генератора О, которое называют **смещением нейтрали**:

$$\dot{U}_{OO'} = \frac{\dot{E}_A \dot{Y}_a + \dot{E}_B \dot{Y}_b + \dot{E}_C \dot{Y}_c}{\dot{Y}_a + \dot{Y}_b + \dot{Y}_c + \dot{Y}_N} \quad (5.5)$$

где \dot{Y}_a , \dot{Y}_b , \dot{Y}_c , \dot{Y}_N - проводимости фаз нагрузки и нулевого провода.

Если $\dot{U}_{OO'} \neq 0$, то фазные напряжения приемника получаются несимметричными. Причем, чем больше смещение нейтрали, тем сильнее отличаются друг от друга фазные напряжения. Поэтому на практике стремятся уменьшить смещение нейтрали до нуля. Получить $\dot{U}_{OO'}$, равное нулю можно двумя способами.

Во-первых, напряжения в фазах приемника будут симметричными, если выровнять нагрузки отдельных фаз. В этом случае $\dot{U}_{OO'} = 0$ и ток в нейтральном проводе $\dot{I}_N = \dot{U}_{OO'} \dot{Y}_N = 0$. Ясно, что четвертый провод (нейтральный) становится лишним и приемники энергии можно присоединить к генератору тремя проводами. В трехфазную цепь без нейтрального провода включают трехфазные двигатели, которые имеют симметричные обмотки и обеспечивают равномерную нагрузку фаз.

Во-вторых, напряжения в фазах приемника будут симметричными при $\dot{Y}_N = \infty$, т.е. если нейтральный провод выполнить с небольшим сопротивлением. В этом случае смещение нейтрали отсутствует независимо от нагрузки отдельных фаз.

Поэтому такие приемники как электрические лампы, нагревательные приборы и др., которые не могут обеспечить строго равномерной нагрузки фаз, включают звездой с нейтральным проводом.

Обрыв нейтрального провода при неодинаковых сопротивлениях фаз приемника влечет за собой изменения фазных напряжений из-за смещения нейтрали. Поскольку изменение фазных напряжений в большинстве случаев недопустимо, в нейтральных

проводах никогда не устанавливают предохранителей и других размыкателей.

5.2 Пример расчета трехфазной цепи при соединении нагрузки по схеме «звезда» с нейтральным проводом

Задание для расчета:

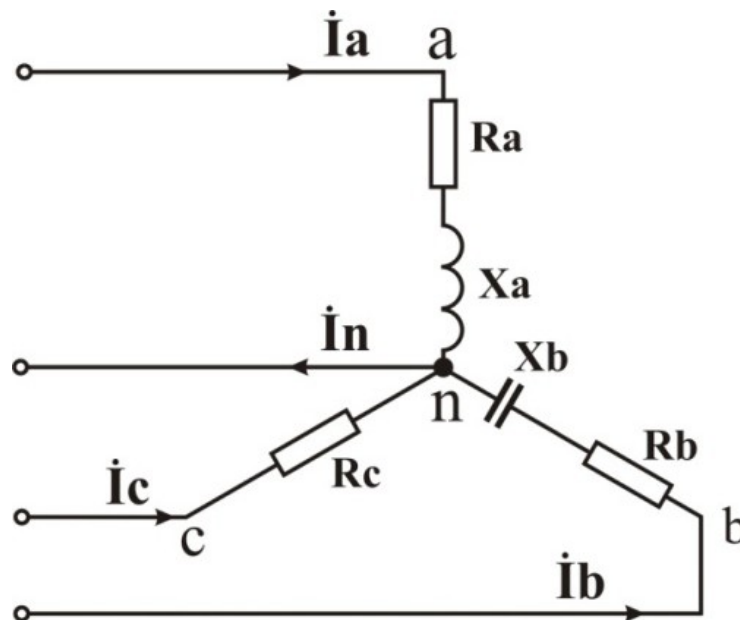
1. Нарисовать схему соединения для своего варианта задания.
2. Определить фазные напряжения $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$.
3. Найти полные сопротивления фаз и фазные токи.
4. Рассчитать ток в нейтральном проводе.
5. Построить (в масштабе) векторную диаграмму (ВД) и определить ток в нейтральном проводе по ВД.
6. Определить активную, реактивную и полную мощность каждой фазы и всей трехфазной нагрузки.

Пример расчета:

Таблица 5 - Исходные данные:

| № вар. | Uл В | Ra Ом | X _{La} Ом | X _{Ca} Ом | Rb Ом | X _{Lb} Ом | X _{Cb} Ом | Rc Ом | X _{Lc} Ом | X _{Cc} Ом |
|--------|------|-------|--------------------|--------------------|-------|--------------------|--------------------|-------|--------------------|--------------------|
| 0 | 173 | 4 | 3 | нет | 8 | нет | 6 | 10 | нет | нет |

1. Схема соединения в соответствии с исходными данными



2. Фазные напряжения

Будем считать, что сопротивление нейтрального провода мало. В этом случае смещение нейтрали отсутствует независимо от нагрузки отдельных фаз ($\dot{U}_{00'} = 0$). Тогда действующие значения фазных напряжений

$$U_a = U_b = U_c = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \frac{173}{1.73} = 100 \text{ В}$$

Направим вектор \dot{U}_A по вещественной оси, тогда

$$\dot{U}_a = \dot{U}_a e^{j0} = 100 \text{ В},$$

$$\dot{U}_b = \dot{U}_b e^{-j120^\circ} \text{ В},$$

$$\dot{U}_c = \dot{U}_c e^{j120^\circ} \text{ В}.$$

3. Полное сопротивление фазы “а” Z_a , угол φ_a и фазный ток \dot{I}_a

$$Z_a = \sqrt{R_a^2 + X_a^2} = \sqrt{4^2 + 3^2} = 5 \text{ Ом}; \quad \varphi_a = \arctg \frac{X_a}{R_a} = 37^\circ$$

$$\dot{Z}_a = Z_a e^{j37^\circ} \text{ Ом};$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_a &= \frac{\dot{U}_A}{\dot{Z}_a} = \frac{100 e^{j0}}{5 e^{j37^\circ}} = 20 e^{-j37^\circ} = \\ &= 20 \cos(37^\circ) - j20 \sin(37^\circ) = (16 - j12) \text{ А} \end{aligned}$$

Аналогично,

$$Z_b = 10 \text{ Ом}; \quad \varphi_b = -37^\circ; \quad \dot{Z}_b = Z_b e^{-j37^\circ} \text{ Ом}; \quad \dot{I}_b = 10 e^{-j83^\circ} = (0.1 - j9.9) \text{ А}$$

$$Z_c = 10 \text{ Ом}; \quad \varphi_c = 0^\circ; \quad \dot{Z}_c = Z_c e^{j0} \text{ Ом}; \quad \dot{I}_c = 10 e^{j120^\circ} = (-5 + j8.7) \text{ А}$$

4. Ток в нейтральном проводе

$$\dot{I}_n = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 16 - j12 + 0.1 - j9.9 - 5 + j8.7 = 11.1 - j13.2 = 17.2 e^{-j50^\circ} \text{ А}$$

$$I_n = \sqrt{11.1^2 + 13.2^2} = 17.2 \text{ А}; \quad \varphi_n = \arctg \frac{-13.2}{11.1} = -50^\circ$$

5. Построение векторной диаграммы

На комплексной плоскости строим три вектора фазных напряжений - от точки “0” вдоль вещественной положительной полуоси откладываем вектор \dot{U}_a в соответствующем масштабе. Далее от вектора \dot{U}_a под углом -120° (в направлении движения часовой стрелки) откладываем вектор \dot{U}_b . Под углом 120° (в направлении противоположном движению часовой стрелки) строим вектор \dot{U}_c .

Относительно вектора \dot{U}_a строим в масштабе вектор фазного тока \dot{I}_a по его вещественной и мнимой составляющим. Аналогично, строим в масштабе фазные токи \dot{I}_b и \dot{I}_c .

Векторная сумма фазных токов определяет ток в нейтральном проводе $\dot{I}_n = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c$.

Пример построения векторной диаграммы для данной задачи представлен на рисунке 5.3.

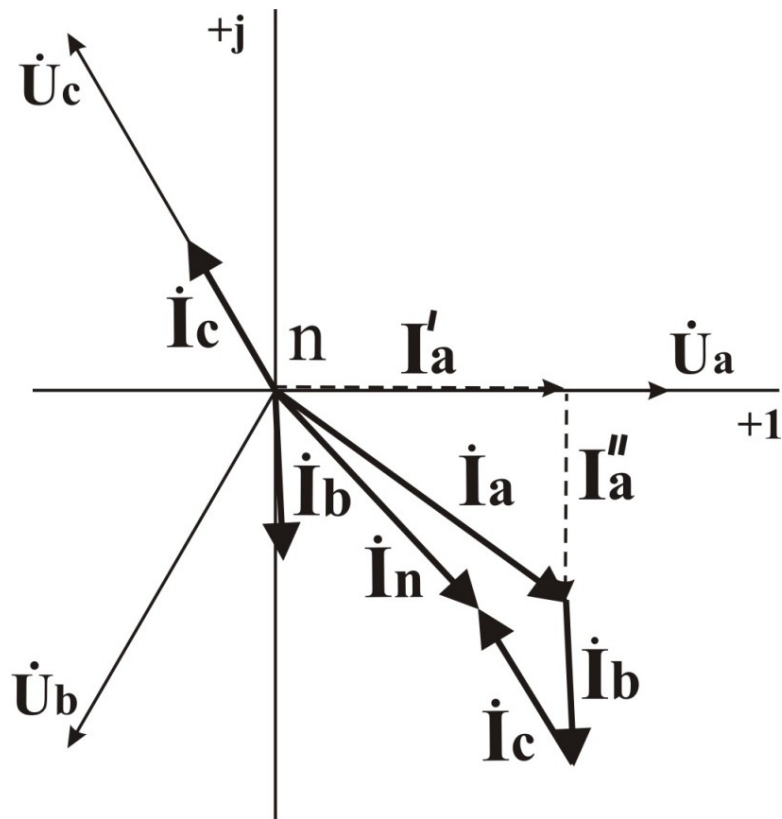


Рисунок 5.3 – Векторная диаграмма

6. Мощности в отдельных фазах приемника вычисляются по комплексам напряжений и токов:

$$\dot{S}_a = \dot{U}_a \cdot \bar{I}_a = 100e^{j0} \cdot 20e^{j37} = 2000e^{j37} = P_a + jQ_a = (1600 + j1200) \text{ ВА}$$

$$\dot{S}_b = \dot{U}_b \cdot \bar{I}_b = 100e^{-j120} \cdot 10e^{j83} = 1000e^{-j37} = P_b - jQ_b = (800 - j600) \text{ ВА}$$

$$\dot{S}_c = \dot{U}_c \cdot \bar{I}_c = 100e^{j120} \cdot 10e^{-j120} = 1000e^{j0} = P_c - jQ_c = (1000 - j0) \text{ ВА}$$

Полная мощность цепи

$$\dot{S} = \dot{S}_a + \dot{S}_b + \dot{S}_c = P_a \pm jQ_a + P_b \pm jQ_b + P_c \pm jQ_c = P \pm jQ = 1600 + j1200 + 800 - j600 + 1000 - j0 = 3400 + j600 = 3452e^{j10} \text{ ВА};$$

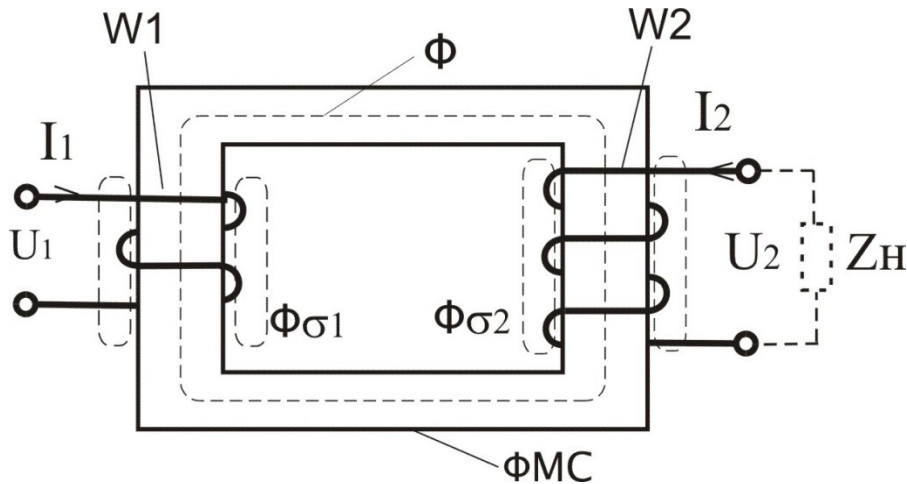
**Таблица 6 - Варианты заданий для расчета трехфазной цепи
при соединении нагрузки звездой с нейтральным
проводом (задание для расчета приведено на стр. 39)**

| № вар. | Uл В | Ra Ом | X_{La} Ом | X_{Ca} Ом | Rb Ом | X_{Lb} Ом | X_{Cb} Ом | Rc Ом | X_{Lc} Ом | X_{Cc} Ом |
|-------------------|-----------------|------------------|------------------------------|------------------------------|------------------|------------------------------|------------------------------|------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1 | 173 | 3 | 4 | нет | 8 | нет | 6 | 4 | нет | 3 |
| 2 | 173 | 8 | нет | 6 | 3 | 4 | нет | нет | нет | 10 |
| 3 | 173 | 5 | нет | нет | 6 | нет | 8 | 4 | 3 | нет |
| 4 | 173 | нет | 10 | нет | 3 | нет | 4 | нет | нет | 5 |
| 5 | 173 | нет | нет | 5 | 8 | 6 | нет | 3 | нет | 4 |
| 6 | 173 | 4 | 3 | нет | нет | 10 | нет | 6 | нет | 8 |
| 7 | 173 | 6 | нет | 8 | нет | нет | 5 | 4 | 3 | нет |
| 8 | 173 | 10 | нет | нет | 4 | 3 | нет | 6 | нет | 8 |
| 9 | 173 | нет | 5 | нет | 6 | 8 | нет | 4 | нет | 3 |
| 10 | 173 | нет | нет | 10 | 4 | нет | 3 | нет | 5 | нет |
| 11 | 173 | 6 | 8 | нет | 8 | нет | 6 | нет | 10 | нет |
| 12 | 173 | 4 | нет | 3 | нет | 5 | нет | 6 | 8 | нет |
| 13 | 173 | 10 | нет | нет | нет | нет | 5 | 3 | 4 | нет |
| 14 | 173 | нет | 5 | нет | нет | нет | 10 | 8 | 6 | нет |
| 15 | 173 | нет | нет | 10 | нет | 5 | нет | 4 | нет | 3 |
| 16 | 173 | 6 | 8 | нет | нет | 10 | нет | нет | нет | 5 |
| 17 | 173 | 4 | нет | 3 | 6 | 8 | нет | нет | 10 | нет |
| 18 | 173 | 10 | нет | нет | 4 | нет | 3 | нет | 5 | нет |
| 19 | 173 | нет | 5 | нет | 6 | нет | 8 | 4 | 3 | нет |
| 20 | 173 | нет | нет | 10 | 3 | 4 | нет | 5 | нет | нет |
| 21 | 173 | 8 | 6 | нет | нет | нет | 10 | 3 | нет | 4 |
| 22 | 173 | 3 | нет | 4 | 8 | 6 | нет | 4 | нет | 3 |
| 23 | 173 | 10 | нет | нет | 3 | 4 | нет | нет | нет | 5 |
| 24 | 173 | нет | 5 | нет | 6 | 8 | нет | нет | нет | 10 |
| 25 | 173 | нет | нет | 10 | 4 | нет | 3 | 6 | 8 | нет |
| 26 | 173 | 4 | 3 | нет | 6 | нет | 8 | нет | нет | 5 |
| 27 | 173 | 6 | нет | 8 | нет | 10 | нет | 4 | нет | 3 |
| 28 | 173 | 10 | нет | нет | нет | 5 | нет | 8 | нет | 6 |
| 29 | 173 | нет | 5 | нет | 3 | нет | 4 | 10 | нет | нет |
| 30 | 173 | нет | нет | 10 | 8 | 6 | нет | 3 | 4 | нет |

ТЕМА 6 ТРАНСФОРМАТОРЫ

Назначение – преобразование переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения без изменения частоты, т.е. для повышения или понижения напряжения. Без трансформаторов передача электроэнергии на большие расстояния была бы невозможна.

Применение – очень широкое – вся силовая энергетика, практически все бытовые и промышленные электронные устройства и т.д.



Устройство – две или более обмоток, расположенных на замкнутом ферромагнитном сердечнике (ФМС). Обмотка, которая подключается к сети, называется первичной. К остальным обмоткам (вторичным) подключаются нагрузки.

Принцип действия трансформатора основан на явлении электромагнитной индукции – законе Фарадея. При подключении первичной обмотки W_1 к сети переменного тока с напряжением $\sim U_1$ по ней течет переменный ток $\sim I_1$, который будет создавать переменный магнитный поток Φ_1 . Основная часть этого потока Φ распространяется по ФМС (основной поток), пронизывает витки вторичной обмотки W_2 и индуцирует в них ЭДС E_2 (закон Фарадея). (при любом изменении магнитного потока в каждой витке индуцируется ЭДС, пропорциональная скорости изменения магнитного потока $e \sim -d\Phi/dt$. Если же ток постоянный, то $\Phi = \text{const}$, $\Rightarrow d\Phi/dt = 0$, $\Rightarrow e = 0$, т.е. постоянный поток ЭДС не создает, \Rightarrow трансформатор не работает на постоянном токе).

Если $W_2 > W_1$ то ЭДС вторичной обмотки $E_2 > E_1 \Rightarrow U_2 > U_1$ – трансформатор повышающий.

Если $W_2 < W_1$ то ЭДС вторичной обмотки $E_2 < E_1 \Rightarrow U_2 < U_1$ – трансформатор понижающий.

Назначение ФМС – ФМС служат для усиления магнитного поля и придания ему нужной конфигурации. При введении в катушку ФМС он намагничивается и его собственное магнитное поле складывается с полем катушки. В результате магнитный поток (МП) резко возрастает (приблизительно в μ раз).

μ – магнитная проницаемость ФМС (до 10 000).

Следовательно, используя ФМС, при том же токе в катушке можно получить в μ раз больший МП, или заданный МП получить при в μ раз меньшем токе в обмотке.

Это огромный плюс использования ФМС. Но есть и минусы.

— В ФМС возникают дополнительные потери энергии (потери в стали)

$$P_{ст} = P_{вт} + P_{г}$$

1. Вихревые потери $P_{вт}$ – ток переменный \Rightarrow МП переменный, он будет в самом ФМС индуцировать ЭДС (закон Фарадея), сердечник проводящий, по нему текут вихревые токи, которые разогревают сердечник. Для уменьшения этих потерь сердечники делают не сплошными, а набирают из тонких изолированных пластин, или прессуют из ферромагнитного порошка с диэлектрическим связующим.

2. Гистерезисные потери $P_{г}$ – или потери на перемагничивание. Ток переменный, при каждом изменении направления тока ФМС перемагничивается, на это тратится энергия, пропорциональная частоте и площади петли гистерезиса. Для уменьшения этих потерь ФМС изготавливают из магнито-мягких материалов с узкой петлей гистерезиса.

Потоки в трансформаторе

Φ – основной поток – в ФМС

$\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$ – потоки рассеяния каждой обмотки. Это часть потока, которая распространяется не по ФМС, а по воздуху. Но эти потоки малы, т.к. магнитное сопротивление воздуха в $\mu_{ФМС}$ раз больше чем у ФМС ($\mu_{воздуха}=1$, а $\mu_{ФМС}$ до 10000).

Работа трансформатора под нагрузкой

Если первичную обмотку W_1 включить в сеть (см. принцип действия), а ко вторичной обмотке W_2 подключить нагрузку Z_H , то по W_2 потечет ток I_2 , который будет создавать свой магнитный поток Φ_2 , направленный навстречу потоку первичной обмотки Φ_1 . Но суммарный основной поток в ФМС

$$\Phi = \Phi_1 - \Phi_2 = \Phi_{10}$$

практически не изменяется и остается равным потоку холостого хода трансформатора Φ_{10} , поскольку при возникновении тока I_2 увеличивается ток первичной обмотки I_1 до тех пор, пока не будет скомпенсировано это размагничивающее действия тока I_2 – постоянство Φ – основное свойство трансформатора.

Основные уравнения трансформатора:

1. Уравнение трансформаторной ЭДС – ЭДС основного потока пропорциональна числу витков W , частоте тока f и амплитуде основного потока Φ_m

$$\dot{E} = -j 4.44 W f \Phi_m \quad (6.1)$$

2. Коэффициент трансформации

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} \cong \frac{U_1}{U_2} \quad (6.2)$$

Определяется в режиме холостого хода трансформатора, когда напряжения на обмотках практически равны ЭДС.

3. Уравнение МДС – магнитодвижущих сил – сумма МДС всех обмоток трансформатора постоянна и равна МДС холостого хода – математическое отображение постоянства магнитного потока

$$\dot{I}_1 W_1 + \dot{I}_2 W_2 = \dot{I}_{10} W_1 \quad (6.3)$$

4. Уравнение равновесия для первичной обмотки. Из II закон Кирхгофа

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{\sigma 1} + r_{m1} \dot{I}_1 = -\dot{E}_1 + jx_{\sigma 1} \dot{I}_1 + r_{m1} \dot{I}_1 \quad (6.4)$$

E_1 – противо ЭДС основного потока в W_1

$E_{\sigma 1}$ – ЭДС потока рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ в W_1

$I_1 r_{m1}$ – падение напряжения на активном сопротивлении первичной обмотки W_1

$I_1 x_{\sigma 1}$ – падение напряжения на индуктивном сопротивлении рассеяния первичной обмотки W_1 ($j x_{\sigma 1} \dot{I}_1 = -\dot{E}_{\sigma 1}$)

5. Уравнение равновесия для вторичной обмотки. Из II закон Кирхгофа

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma 2} - r_{m2} \dot{I}_2 = \dot{E}_2 - jx_{\sigma 2} \dot{I}_2 - r_{m2} \dot{I}_2 \quad (6.5)$$

E_2 – ЭДС основного потока в W_2

$E_{\sigma 2}$ – ЭДС потока рассеяния $\Phi_{\sigma 2}$ в W_2

$I_2 r_{m2}$ – падение напряжения на активном сопротивлении вторичной обмотки W_2

$I_2 x_{\sigma 2}$ – падение напряжения на индуктивном сопротивлении рассеяния W_2 ($jx_{\sigma 2} \dot{I}_2 = -\dot{E}_{\sigma 2}$)

Это уравнение показывает, что выходное напряжение на вторичной обмотке равно ЭДС (E_2), которую индуцирует основной поток Φ , минус падения напряжения на активном сопротивлении обмотки ($I_2 r_{m2}$) и на ее индуктивном сопротивлении рассеяния ($I_2 x_{\sigma 2}$).

Внешняя характеристика трансформатора

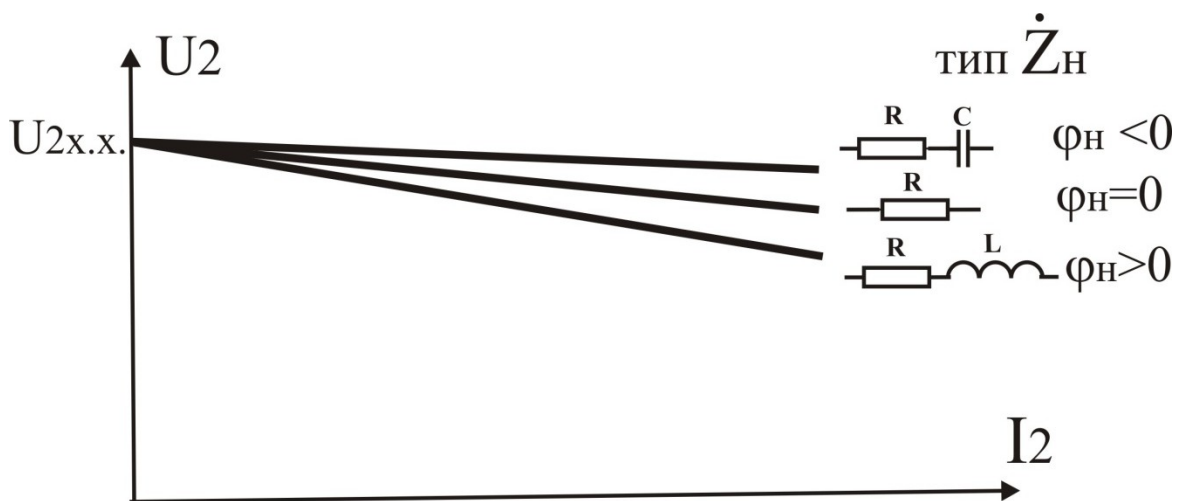
Внешняя характеристика – это зависимость напряжения на вторичной обмотке трансформатора U_2 от тока во вторичной обмотке I_2 ($U_2 = f(I_2)$), т.е. внешняя характеристика показывает, как изменяется напряжение на выходе трансформатора U_2 при увеличении тока нагрузки I_2 (при постоянном характере нагрузки и номинальном U_1).

Как у любого источника, напряжение на вторичной обмотке трансформатора U_2 отличается от ЭДС E_2 на величину падения напряжения на внутреннем сопротивлении трансформатора.

Из уравнения (3.5)

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - jx_{\sigma 2} \dot{I}_2 - r_{m2} \dot{I}_2 = \dot{E}_2 - \Delta \dot{U}_2(I_2) \quad (6.6)$$

видно, что U_2 линейно зависит от I_2 и внутреннего сопротивления трансформатора. Более точный анализ показывает, что на внешнюю характеристику влияет также характер нагрузки, т.е. тип Z_H



КПД мощных трансформаторов – очень высокий (0.98–0.99).

ТЕМА 7 ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

ЭД – электродвигатель

ИМ – исполнительный механизм

МХ – механическая характеристика

СД – синхронный двигатель

АД – асинхронный двигатель

ДПТ – двигатель постоянного тока

МП – магнитный поток

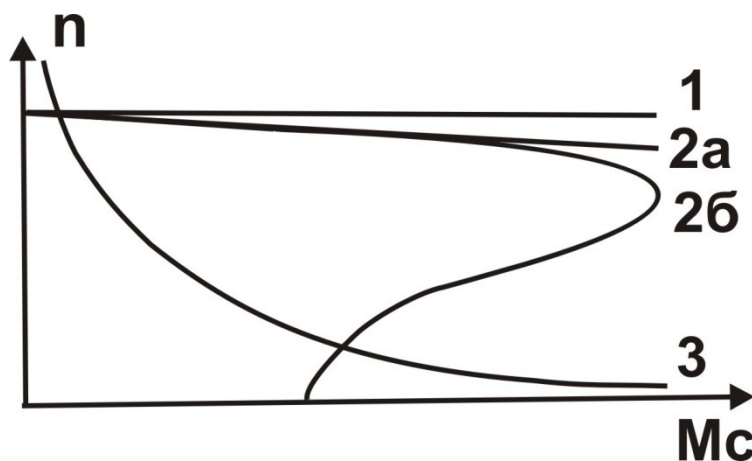
Механические характеристики ЭД и ИМ

Электропривод – это совокупность ЭД, системы передач и ИМ. Работа электропривода определяется МХ ЭД и ИМ. Физически для ЭД частота вращения зависит от нагрузки (т.е. от момента сопротивления на валу). А для ИМ момент сопротивления зависит от частоты вращения, но принято их строить в единой системе координат



$n = f(M_c)$ n – [об/мин]; M_c – [Нм]
Механическая характеристика – это зависимость числа оборотов от момента (сопротивления) на валу электропривода. В установившемся режиме $M_{вр} = M_c$, $n = const$ – условие устойчивого вращения электропривода.

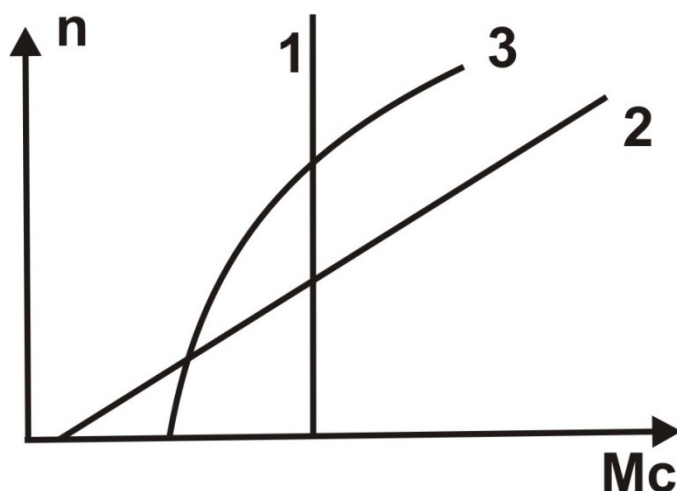
Основные типы МХ ЭД



1. ЭД с абсолютно жесткой МХ – n не зависит от M_c – СД
2. ЭД с жесткой МХ – n мало уменьшается с ростом M_c
 - 2а – ДПТ с параллельным и независимым возбуждением
 - 2б – асинхронный двигатель АД

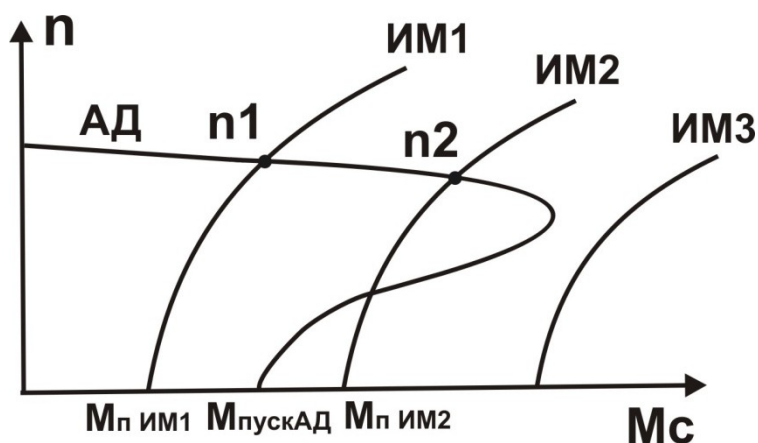
3. ЭД с мягкой МХ – n резко падает с ростом M_C – ДПТ с последовательным возбуждением.

Основные типы МХ ИМ



1. M_C не зависит от n – лифты, подъемники
2. M_C линейно зависит от n – пара двигатель–генератор
3. Параболическая зависимость M_C от n – вентиляторы, компрессоры и т.д.

Чтобы оценить свойства привода достаточно наложить МХ ИМ на МХ АД. Возьмем МХ АД и наложим на нее МХ трех вентиляторов



АД + ИМ1 – возможен пуск ($M_{пускАД} > M_{пИМ1}$) и устойчивое вращение со скоростью n_1 ($M_{АД} = M_{ИМ1}$)

АД + ИМ2 – пуск невозможен ($M_{пускАД} < M_{пИМ2}$) но если раскрутить, то возможно устойчивое вращение со скоростью n_2 ($M_{АД} = M_{ИМ2}$)

АД + ИМ3 несовместимы, МХ не пересекаются ($M_{АД}$ всегда $< M_{ИМ3}$)

АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Устройство и принцип действия АД

Работа асинхронного двигателя (АД) основана на явлении электромагнитной индукции (закон Фарадея) и силе Ампера – силы, действующей на проводник с током в магнитном поле.

Магнитное поле (МП) создает статор – неподвижная часть АД. Это полый наборный цилиндр из ферромагнитного материала (ФМС), в пазах статора 3 (или $3p$) обмоток, сдвинутых относительно друг друга на 120° . Обмотки питаются от сети трехфазного переменного тока. Каждая обмотка создает свое магнитное поле, которое изменяется по синусоидальному закону. В результате сложения полей трех обмоток в полости статора образуется МП, постоянное по величине и переменное по направлению – вектор МП поворачивается в плоскости, перпендикулярной оси статора – т.е. вращающееся МП.

Скорость вращения МП статора – n_1 зависит только от частоты сети f_1 и числа пар полюсов p

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} \quad (7.1)$$

Если статор АД имеет 3 обмотки, то $p=1$, а $n_1 = 3000$ об/мин. при частоте сети $f = 50$ Гц.

Для изменения p используются либо многообмоточные статоры, либо статоры, в которых обмотки разделены на секции, в каждой из которых можно независимо менять направление тока.

В результате, при

| | |
|-------|----------------------------|
| $p=2$ | $n_1 = 1500$ об/мин |
| $p=3$ | $n_1 = 1000$ об/мин и т.д. |

Ротор – подвижная часть АД, расположен на оси АД.

Ротор бывает двух типов:

1. Короткозамкнутый – (беличье клетка) – два медных кольца, соединенных медными стержнями.
2. Фазный – имеет три обмотки, соединенные звездой. Концы обмоток выведены на контактные кольца, к которым с помощью щеток можно подключить трехфазный пусковой реостат R_p . АД с фазным ротором обладает улучшенными пусковыми и регулировочными свойствами (см. пуск и регулирование скорости АД).

Принцип действия АД – трехфазный переменный ток I_1 , протекая по обмоткам статора, создает переменное вращающееся МП, которое в витках ротора индуцирует ЭДС E_2 . Витки ротора замкнуты, по ним течет ток I_2 . На проводник с током в МП действует сила Ампера и

ротор начинает вращаться в направлении МП. Но скорость вращения ротора n всегда меньше скорости вращения МП n_1 – т.е. асинхронное вращение – асинхронный двигатель.

Если $n = n_1$, то МП неподвижно относительно ротора, т.е. постоянно, а постоянное поле не индуцирует ЭДС ($d\Phi/dt = 0$, \Rightarrow ЭДС ротора = 0, $\Rightarrow I_2=0$, $\Rightarrow F_A=0$, $\Rightarrow M_{вр}=0$)

Основные уравнения АД

Скольжение – относительная разность скорости МП n_1 и ротора n .

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (7.2)$$

Скорость изменения МП в роторе пропорциональна разности скоростей ($n_1 - n$), т.е. скольжению \Rightarrow ЭДС ротора E_{2S} , частота тока в роторе f_{2S} и индуктивное сопротивление ротора X_{2S} пропорциональны скольжению S

$$E_{2S} = E_2 S \quad (7.3)$$

$$f_{2S} = f_2 S \quad (7.4)$$

$$X_{2S} = X_2 S \quad (7.5)$$

где: E_2 , $f_2=f_1$, X_2 – ЭДС, частота и индуктивное сопротивление неподвижного ротора (при $n = 0$, $S = 1$).

Электромагнитные процессы в АД такие же, как в трансформаторе (при $n=0$, $S=1$ АД – это трансформатор с короткозамкнутой вторичной обмоткой), поэтому для анализа АД можно использовать основные уравнения трансформатора с учетом соотношений 4.3 – 4.5

Из уравнения трансформатора (6.6) ($U_2 = E_2 - I_2 r_{m2} - I_2 x_{\sigma 2}$), учитывая, что ротор короткозамкнут ($Z_H = 0 \Rightarrow U_2 = 0$) получим для АД

$$\dot{E}_{2S} = \dot{E}_2 S = r_{m2} \dot{I}_2 + jx_{2S} \dot{I}_2 \quad (7.6)$$

Из (7.6) ток ротора I_2

$$I_2 = \frac{E_2 S}{\sqrt{r_2^2 + (x_2 S)^2}} = \frac{E_2 S}{Z_2} \quad (7.7)$$

Z_2 – полное сопротивление вращающегося ротора (зависит от S , т.е. от скорости вращения ротора n).

Момент вращения АД

Момент вращения пропорционален силе Ампера – силе, действующей на проводник с током в МП

$$M_{вр} \sim F_A \sim I_2 B \sin(B \wedge I_2)$$

$$B \sim \Phi \sim U_1$$

$$I_2 = \frac{E_2 S}{Z_2} \sim \frac{\Phi S}{Z_2} \sim \frac{U_1 S}{Z_2}$$

$$\sin(B \wedge I_2) \sim \cos(E_2 \wedge I_2) \sim r_2 / Z_2$$

$$M_{вр} = C'' \frac{U_1^2 r_2 S}{r_2^2 + (x_2 S)^2} \quad (7.8)$$

1. $M_{вр} \sim U_1^2 \Rightarrow M_{вр}$ резко падает при уменьшении напряжения питания статора U_1
2. Если $n = n_1, \Rightarrow S = 0, \Rightarrow M_{вр} = 0$, т.е. скорость ротора n всегда меньше скорости МП статора n_1 .
3. Из условия $dM/dS = 0$ можно определить критическое скольжение, при котором момент АД будет максимальным

$$S_{кр} = r_2 / x_2$$

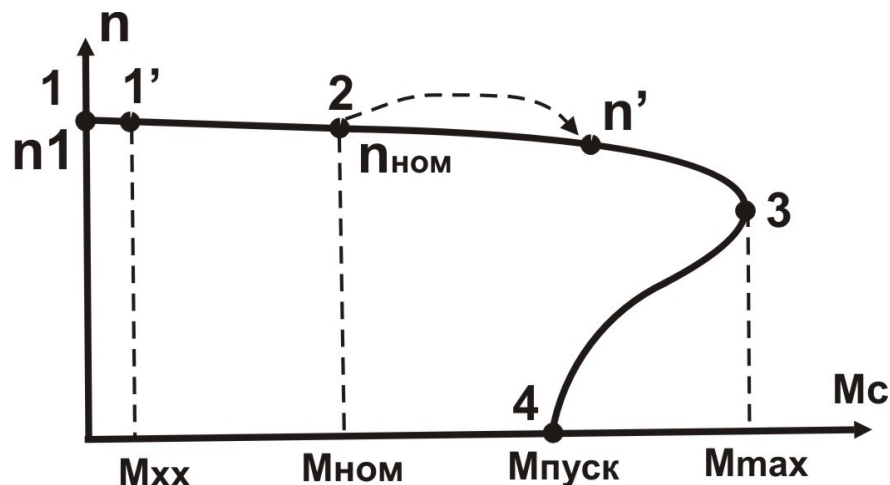
Подставив $S_{кр}$ в уравнение 7.8 получим

$$M_{max} = C'' \frac{U_1^2 r_2 \frac{r_2}{x_2}}{r_2^2 + (x_2 \frac{r_2}{x_2})^2} = C'' U_1^2 \frac{1}{2x_2}$$

т.е. M_{max} не зависит от активного сопротивления ротора r_2 . Это используется при пуске и регулировании скорости АД.

Механическая характеристика АД

МХ – зависимость скорости вращения ротора от момента сопротивления $n = f(Mс)$, показывает, как изменяется n при увеличении нагрузки двигателя.



- (.)1 – идеальный холостой ход – $n = n_1$; $S = 0$; $M_{вр} = 0$
 (.)1' – реальный холостой ход – $n = n_{xx}$; $S = 0,005-0,01$; $M_{вр} = M_{xx}$
 (.)2 – номинальный режим – $n = n_{ном}$; $S = S_{ном} = 0,02-0,06$; $M_{вр} = M_{ном}$
 При номинальном режиме скорость ротора всего на 2–6% меньше скорости МП статора
 (.)3 – критическая точка $n = n_{кр}$; $S = S_{кр} = 0,1-0,5$; $M_{вр} = M_{max}$
 $M_{max}/M_{ном} = 2 - 2,5$ – перегрузочная способность АД
 (.)4 – пусковой режим $n = 0$; $S = S_{пуск} = 1$; $M_{вр} = M_{пуск}$
 $M_{пуск}/M_{ном} = 1,8 - 2$ – кратность пускового момента
- Рабочий участок МХ 1 – 3. На этом участке при \uparrow (увеличении) $M_{С им}$ АД сбрасывает обороты $n \Rightarrow$ (следовательно) $(n_1-n) \uparrow, \Rightarrow d\Phi/dt \uparrow, \Rightarrow E_2 \uparrow, \Rightarrow I_2 \uparrow, \Rightarrow M_{вр} \uparrow$ и (.) равновесия $M_{вр АД} = M_{С им}$ смещается по МХ в область с меньшей скоростью, но большим $M_{вр}$. При $M_{С им} > M_{max}$ двигатель останавливается.
 Участок 3 – 4 – участок разгона.

Способы пуска АД

При пуске скорость ротора $n = 0, \Rightarrow$ разность скоростей МП n_1 и ротора n $(n_1-n) - max, \Rightarrow d\Phi/dt - max, \Rightarrow ЭДС E_2 - max \Rightarrow$ токи ротора I_2 и статора $I_1 - max$.

При пуске АД в роторе и статоре текут токи много больше номинальных

$$I_2 = (7 \div 10) I_{2 ном} \quad I_1 = (5 \div 7) I_{1 ном}$$

Это опасно и для АД и для питающей сети. Поэтому только маломощные АД (до 1 кВт) можно пускать без специальных методов пуска, которые нужны, чтобы:

1. Уменьшить пусковые токи.
2. Обеспечить плавный пуск при максимальном пусковом моменте.

Способы уменьшения пусковых токов АД

Из уравнения (7.7)
$$I_2 = \frac{E_2 S}{Z_2} = \frac{E_2 S}{\sqrt{r_2^2 + (x_2 S)^2}}$$

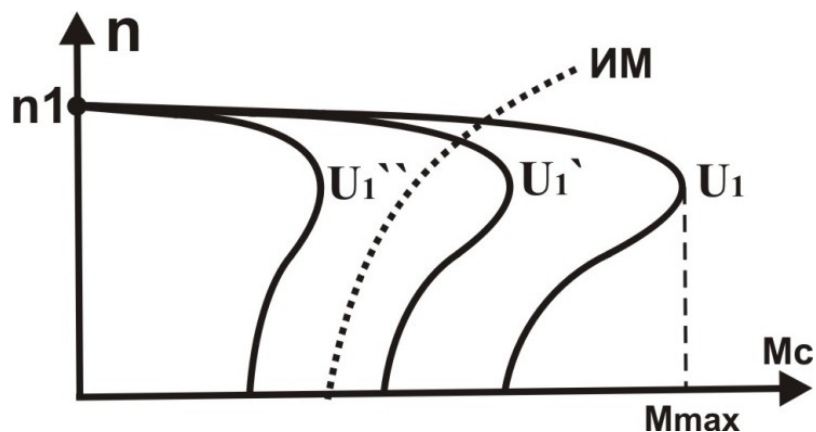
Есть два пути уменьшения $I_2 (\Rightarrow I_1)$

- $\swarrow \downarrow U_1 \Rightarrow \downarrow \Phi \Rightarrow \downarrow E_2 \Rightarrow \downarrow I_2 \Rightarrow \downarrow I_1$
- $\searrow \uparrow r_2 \Rightarrow \downarrow I_2 \Rightarrow \downarrow I_1$

1. Способы, основанные на уменьшении (\downarrow) напряжения питания статора U_1

$M_{вр} \sim U_1^2$, следовательно, все методы, основанные на \downarrow (уменьшении) U_1 в приводят к резкому уменьшению $M_{вр}$.

Изменение МХ при уменьшении напряжения питания U_1



Достоинство – простота реализации

U_1 можно уменьшить:

1. с помощью трансформатора
2. включить последовательно со статором 3 катушки индуктивности
3. при пуске включить обмотки статора звездой ($U_1=U_{л}/\sqrt{3}$), после разгона АД переключить обмотки на треугольник ($U_1=U_{л}$). При пуске напряжение \downarrow в $\sqrt{3}$ раз, а $M_{вр} \downarrow$ в 3 раза.

2. Методы, основанные на увеличении сопротивления ротора r_2

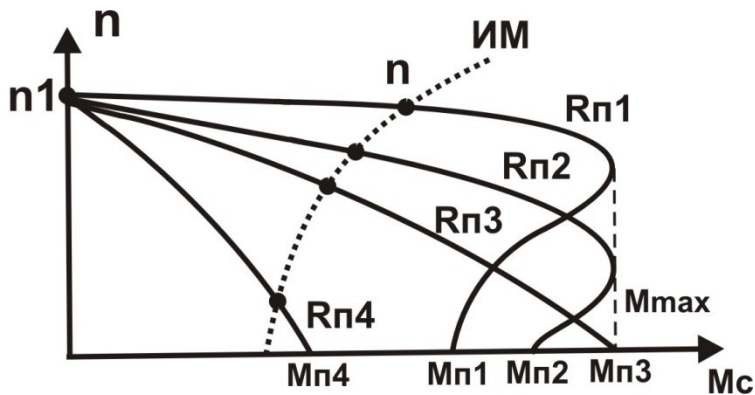
1. Короткозамкнутый ротор с улучшенными пусковыми характеристиками – имеет двойную “беличью клетку” с разным сопротивлением. При пуске ток течет по внешней клетке с большим активным и меньшим полным сопротивлением, после разгона частота тока в роторе резко падает, индуктивное и полное сопротивление обмоток уменьшается, и ток, в основном, течет по клетке с малым активным сопротивлением.

2. В АД с фазным ротором при пуске в цепь ротора включают трехфазный пусковой реостат $R_{п} \gg r_2$ Токи I_2 и I_1 резко уменьшаются. Поскольку максимальный момент не зависит от активного сопротивления ротора, то можно обеспечить \downarrow (уменьшение) пусковых токов без \downarrow момента, т.е. обеспечить плавный пуск нагруженного АД.

Недостатки:

- (–) нужен АД с фазным ротором
- (–) большие потери энергии в пусковом реостате

Влияние активного сопротивления ротора на МХ



При увеличении R_{Π} МХ становится более мягкой.

При не слишком больших R_{Π} пусковой момент возрастает $M_{\Pi3} > M_{\Pi2} > M_{\Pi1}$ и может стать равным M_{\max} .

Регулирование скорости вращения АД

Скорость ротора n мало отличается от скорости МП n_1 (всего на 2–6 %), поэтому чтобы изменить n нужно изменять n_1

$$n = n_1 (1 - S) = \frac{60f_1}{p} (1 - S)$$

Есть два пути изменения n_1 , следовательно, и скорости ротора n

1. Изменение частоты сети f_1

Достоинства (+) и недостатки (–)

(+) можно плавно увеличивать и уменьшать $n_1 \Rightarrow n$

(–) нужны сложные и дорогие преобразователи частоты.

Используется для маломощных АД.

2. Изменение числа пар полюсов p

(+) простота и экономичность

(–) ступенчатое регулирование

(–) можно только уменьшить скорость $p=1 \quad n_1=3000$
 $p=2 \quad n_1=1500$ и т.д.

(–) нужен АД со сложным статором и сложный переключатель для переключения секционированных обмоток.

3. В АД с фазным ротором можно плавно регулировать скорость от 0 до $n_{\text{ном}}$, изменяя сопротивление мощного пуско–регулирующего реостата (см. предыдущий рис.)

Применение АД – очень широкое

Достоинства и недостатки (+) и (–) АД:

- (+) простота конструкции, высокая надежность, низкая стоимость, жесткая МХ, различные варианты исполнения (герметичные, взрывобезопасные, хим. защищенные и т.д.).
- (-) сложность регулирования скорости
- (-) при $f=50$ Гц $n_{ном} < 3000$ об/мин

ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Плюсы и минусы ДПТ по сравнению с АД:

- (+) Просто регулируется скорость n
- (+) Можно получить $n \gg 3000$ об/мин
- (+) обратимость – можно использовать как двигатель и как генератор
- (-) сложная конструкция, высокая стоимость
- (-) низкая надежность (необходимы скользящие контакты для подвода тока к вращающемуся якорю).

Устройство и принцип действия ДПТ.

Корпус (станина) из ферромагнетика имеет два (или $2N$) основных полюса, на которых расположены обмотки возбуждения ОВ. Постоянный ток возбуждения I_B , протекая по ОВ, создает между полюсами постоянное магнитное поле МП.

Якорь – подвижная часть ДПТ, имеет обмотки, концы которых подключены к коллектору, набранному из изолированных медных сегментов. К якорю через щетки и коллектор от внешнего источника питания U_Y подводится постоянный ток I_Y .

Принцип действия ДПТ.

Постоянный ток возбуждения I_B , протекая по обмоткам возбуждения ОВ, создает постоянный магнитный поток Φ . К якорю, через щетки и коллектор, подводится постоянный ток якоря I_Y . Сила взаимодействия тока якоря I_Y и МП Φ (сила Ампера) создает момент вращения.

Основные уравнения ДПТ.

$$M_{вр} \sim F_A \sim I_Y \Phi \Rightarrow M_{вр} = C_M I_Y \Phi \quad (7.9)$$

При вращении якоря в МП в нем индуцируется ЭДС индукции E_Y

$$E_Y \sim d\Phi/dt \sim \Phi \text{ и } n \Rightarrow E_Y = C_E \Phi n \quad (7.10)$$

Эта ЭДС направлена навстречу напряжению питания якоря U_Y (правило Ленца) \Rightarrow

$$I_Y = \frac{U_Y - E_Y}{r_Y} \quad \text{уравнение цепи якоря} \quad (7.11)$$

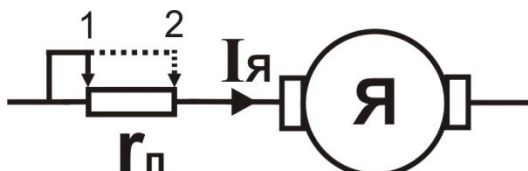
Пуск ДПТ

При пуске ДПТ якорь неподвижен $\Rightarrow n = 0 \Rightarrow E_{\text{я}} = C_E \Phi n = 0 \Rightarrow$

$$I_{\text{я ПУСК}} = (U_{\text{я}} - E_{\text{я}}) / r_{\text{я}} = U_{\text{я}} / r_{\text{я}} \gg I_{\text{я НОМ}} \quad (\text{в } 10 - 20 \text{ раз})$$

Для уменьшения $I_{\text{я}}$ при пуске в цепь якоря вводят пусковой реостат $r_{\text{п}}$ после разгона двигателя этот реостат полностью закорачивают (реостат рассчитан только на кратковременный пусковой режим).

(Пуск 1 – $r_{\text{п}} = \text{max}$),
(Работа 2 – $r_{\text{п}} = 0$)



Регулирование скорости ДПТ

Из (7.10) $E_{\text{я}} = C_E \Phi n$

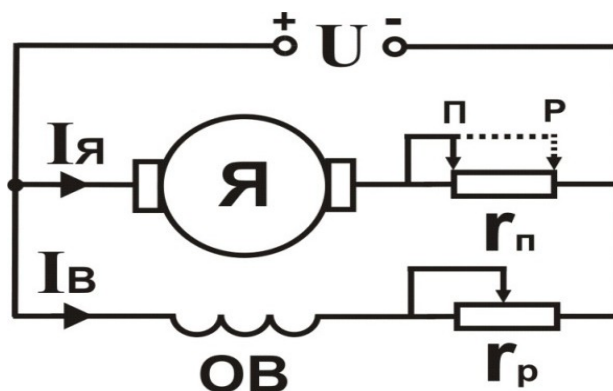
Из (7.11) $E_{\text{я}} = U_{\text{я}} - I_{\text{я}} r_{\text{я}}$

$$\Rightarrow n = \frac{E_{\text{я}}}{C_E \Phi} = \frac{U_{\text{я}} - I_{\text{я}} r_{\text{я}}}{C_E \Phi} \quad (7.12)$$

Изменять скорость n можно:

1. Изменяя напряжение питания $U_{\text{я}}$
2. Изменяя ток якоря $I_{\text{я}}$ (последовательно с якорем включают реостат)
3. Изменяя ток возбуждения $I_{\text{в}} \Rightarrow \text{МП } \Phi$ – последовательно с ОВ включают регулировочный реостат $r_{\text{р}}$. Изменяя сопротивление $r_{\text{р}}$, можно менять $I_{\text{в}} \Rightarrow \Phi \Rightarrow n$ (см. 7.12). Этот метод используется чаще всего, т.к. $I_{\text{в}} \ll I_{\text{я}}$ – проще регулировать, особенно для мощных ДПТ.

ДПТ с параллельным возбуждением



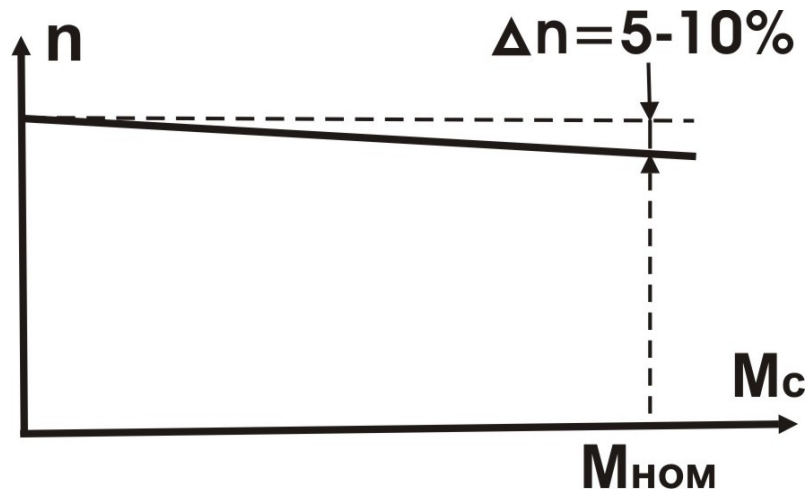
Якорь и ОВ подключены к источнику питания параллельно $\Rightarrow I_B$ и Φ не зависят от I_A , т.е. от нагрузки ДПТ.

$\Phi = \text{const}$; $M_{BR} = C_M \Phi I_A = k I_A$ – линейно зависит от тока якоря
 $\Rightarrow I_A = k' M_{BR} = k' M_{COOP}$ (в установившемся режиме $M_{BR} = M_{COOP}$)

Подставляя I_A в (7.12), получим

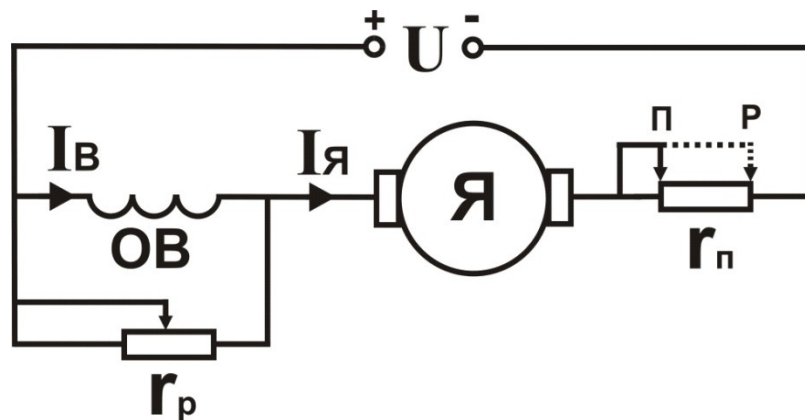
$$n = n_0 - \Delta n (M_{COOP}) \quad (7.13)$$

т.е. механическая характеристика линейная и жесткая.



Использование – если нужен высокоскоростной или хорошо регулируемый двигатель (ультрацентрифуги).

ДПТ с последовательным возбуждением



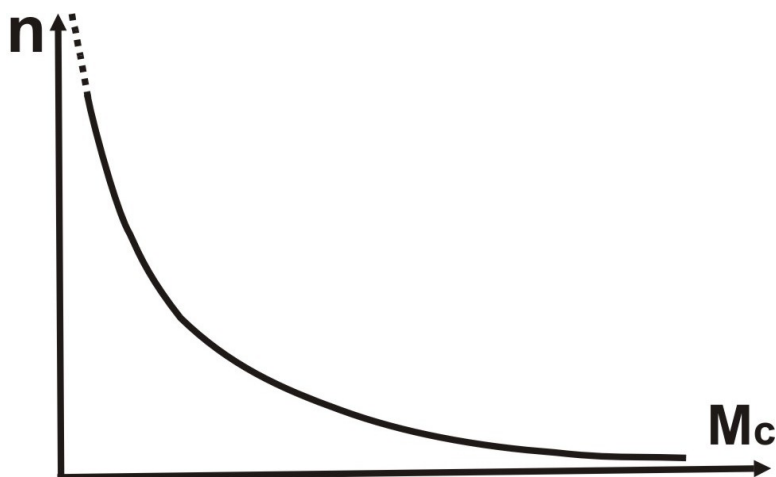
Якорь и ОВ подключены к источнику питания последовательно $\Rightarrow I_B$ и МП Φ зависят от I_A , т.е. от нагрузки ДПТ.

$I_B \sim I_A \Rightarrow \Phi \sim I_A \Rightarrow M_{BR} = C_M \Phi I_A = k' I_A^2$ – квадратичная зависимость от тока якоря
 $\Rightarrow I_A = k' \sqrt{M_{BR}} = k' \sqrt{M_{COOP}}$ (в установившемся режиме $M_{BR} = M_{COOP}$)

Подставляя I_A в (7.12), получим

$$n = \frac{n'}{\sqrt{M_{\text{сопр}}}} - n'' \quad (7.14)$$

т.е. механическая характеристика нелинейная и мягкая.



При $M_{\text{с}} \rightarrow 0$, $n \rightarrow \infty \Rightarrow$ нельзя включать без нагрузки – двигатель идет вразнос ($M_{\text{с мин}} = 0.25 M_{\text{ном}}$).

Использование – если нужен регулируемый двигатель с большим пусковым моментом (транспорт).

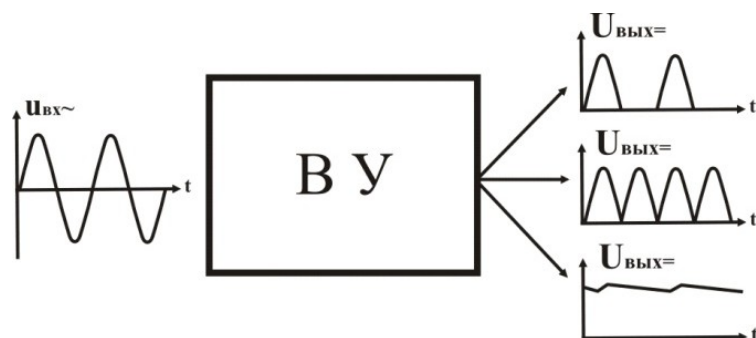
Классификация ДПТ по способу возбуждения

1. ДПТ с независимым возбуждением – якорь и ОВ подключены к двум разным источникам.
2. ДПТ с параллельным возбуждением – якорь и ОВ подключены параллельно к одному источнику.
В обоих случаях $I_{\text{в}}$ и Φ не зависят от $I_{\text{я}}$ – МХ жесткая и линейная.
3. ДПТ с последовательным возбуждением – якорь и ОВ подключены последовательно к одному источнику – $I_{\text{в}}$ и Φ сильно зависят от $I_{\text{я}}$ – МХ мягкая и нелинейная.
4. ДПТ со смешанным возбуждением – имеет две ОВ, одна включена с якорем последовательно, а вторая – параллельно. Изменяя соотношения токов этих ОВ, можно изменять МХ ДПТ от жесткой до мягкой.

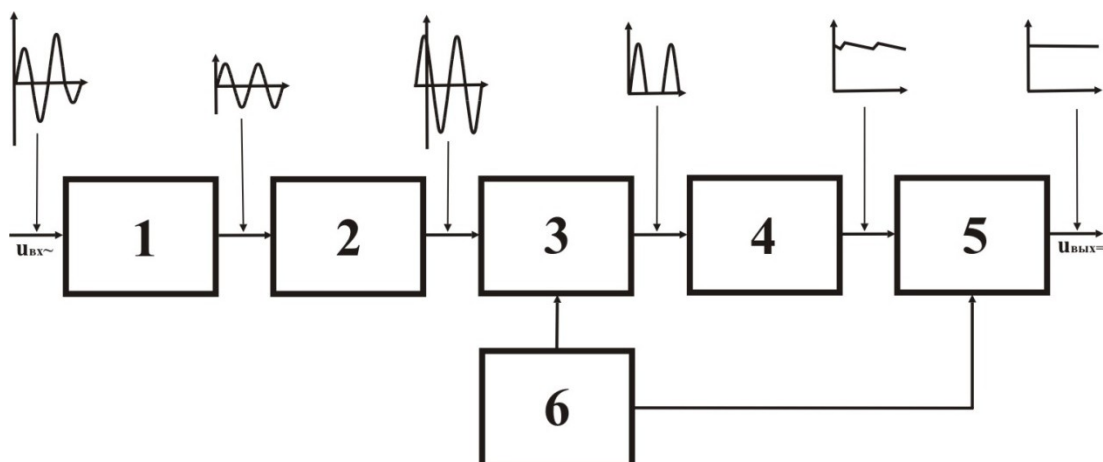
ЧАСТЬ 2 ЭЛЕКТРОНИКА

ТЕМА 8 ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Назначение выпрямительного устройства (ВУ) – преобразование знакопеременного тока в знакостоянный, т.е. для выпрямления переменного тока и напряжения.



Структурная схема ВУ



1 – стабилизатор переменного напряжения – стабилизирует амплитуду переменного напряжения при изменении напряжения сети $U_{вх}~$

2 – Трансформатор – изменяет (увеличивает или уменьшает) переменное напряжение. Связь между обмотками трансформатора только через магнитное поле => сеть и выход ВУ полностью гальванически разделены.

3 – Вентиль – обладает односторонней проводимостью, т.е. пропускает ток только в одном направлении, основной блок ВУ, именно он преобразует знакопеременный ток в знакостоянный.

Вентиль открыт, если потенциал его анода (А) больше потенциала его катода (К).



$\varphi_A > \varphi_K$ – вентиль открыт
 $\varphi_A < \varphi_K$ – вентиль закрыт

Основные параметры вентиля:

- $R_{пр}$ – прямое сопротивление открытого вентиля.
- $R_{обр}$ – обратное сопротивление закрытого вентиля.
- $I_{пр\ max}$ – допустимый прямой ток, превышение которого приводит к перегреву и тепловому пробоему вентиля.
- $U_{обр\ max}$ – допустимое обратное напряжение, превышение которого приводит к электрическому пробоему вентиля.

- 4 – Фильтр – сглаживает пульсацию (изменение) выпрямленного напряжения, т.е. уменьшает его переменную составляющую.
- 5 – стабилизатор постоянного напряжения – поддерживает постоянное напряжение на выходе ВУ при изменении напряжения на входе или тока нагрузки.
- 6 – Блок управления – позволяет изменять выходное напряжение ВУ, воздействуя на стабилизатор 5, или вентиль 3.

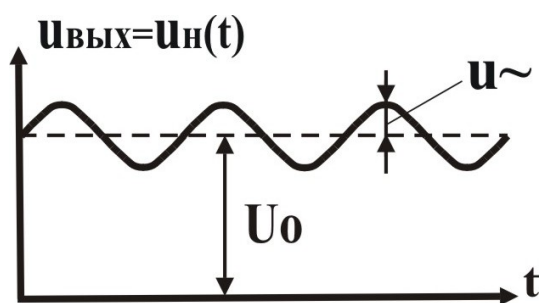
В реальных ВУ ряд блоков может отсутствовать, но вентиль есть всегда – вентиль – основной блок ВУ.

Основные параметры и характеристики ВУ

1. Зависимость напряжения на выходе ВУ от времени

$$u_H(t) = U_0 + u_{\sim} = U_0 + U_{m1}\sin(\omega t) + U_{m2}\sin(2\omega t) + \dots$$

Выходное напряжение имеет постоянную составляющую U_0 и переменную составляющую (пульсацию) u_{\sim}



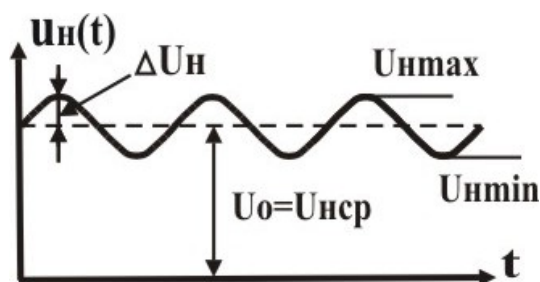
2. Среднее значение выпрямленного напряжения

$$U_{нсп} = \frac{1}{T} \int_0^T u_H(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T U_0 dt + \frac{1}{T} \int_0^T u_{\sim} dt = U_0$$

$$U_{нсп} = U_0$$

Среднее значение напряжения на выходе ВУ ($U_{нсп}$) равно постоянной составляющей выпрямленного напряжения U_0 .

3. Коэффициент пульсации – характеризует качество выпрямленного напряжения. Это отношение амплитуды переменной составляющей напряжения на выходе ВУ (пульсации) к постоянной (т.е. к среднему значению).



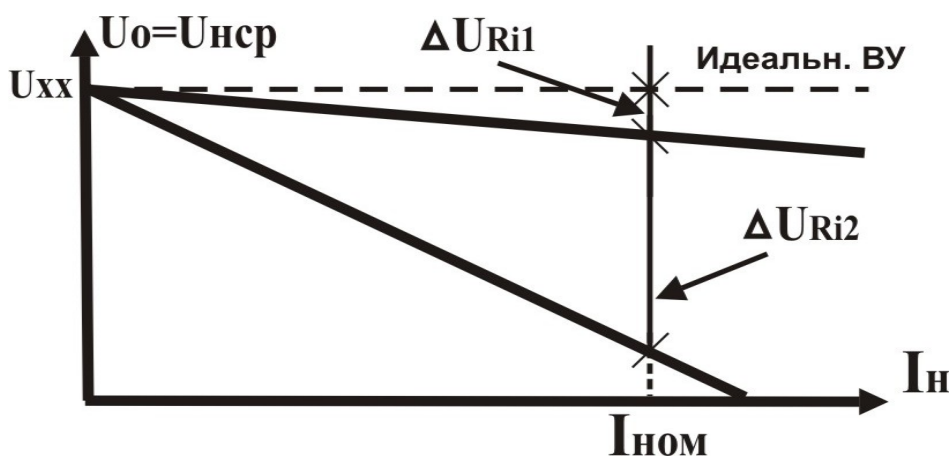
$$K_{\Pi} = \frac{\Delta U_n}{U_{нсп}}$$

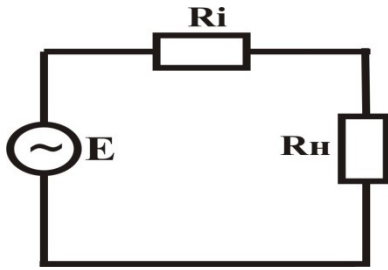
$$\Delta U_n = \frac{U_{нmax} - U_{нmin}}{2}$$

4. Максимальный ток нагрузки $I_n \max$ – превышение которого приводит к выходу из строя ВУ.
5. Напряжение питания ВУ – $U_{вх\sim}$ (напряжение сети).
6. КПД, габариты, вес, стоимость.

Внешняя характеристика ВУ $U_0 = U_{нсп} = f(I_n)$

– это зависимость постоянной составляющей выходного напряжения U_0 от тока в нагрузке I_n . При подключении нагрузки R_n напряжение на выходе ВУ будет отличаться от его ЭДС ($E = U_{хх}$) на величину падения напряжения на его внутреннем сопротивлении R_i .





$$U_0 = U_{\text{нсп}} = U_{\text{хх}} - I_{\text{н}} R_i = U_{\text{хх}} - \Delta U_{R_i}$$

$$\Delta U_{R_{i1}} = I_{\text{н0M}} R_{i1}$$

$$\Delta U_{R_{i2}} = I_{\text{н0M}} R_{i2}$$

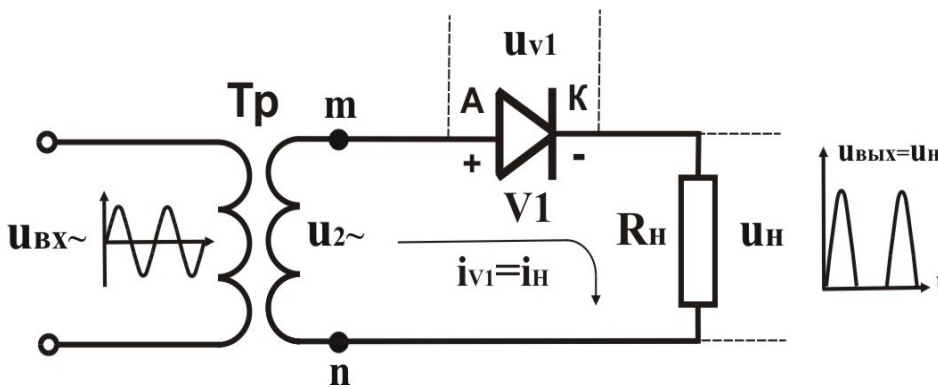
$$R_{i1} < R_{i2}$$

$$\Delta U_{R_{i1}} < \Delta U_{R_{i2}}$$

$$U_{01} > U_{02}$$

С ростом тока нагрузки $I_{\text{н}}$ напряжение на выходе ВУ уменьшается из-за падения напряжения ΔU_{R_i} на его внутреннем сопротивлении R_i . Чем больше R_i , тем меньше выходное напряжение при том же токе.

Однополупериодная схема ВУ



$$u_{\text{ВХ}\sim} = u_{1\sim} = U_1 m \sin(\omega t); u_{2\sim} = U_2 m \sin(\omega t)$$

Будем считать, что T_r и вентиль V_1 – идеальны: $R_{T_r} = 0$; $R_{p_1} = 0$, $R_{o_1} = \infty$

1-й полупериод

в (.) m “+” \Rightarrow + на аноде $V_1 \Rightarrow \varphi_A > \varphi_K \Rightarrow V_1$ – открыт ($R_{v1}' = R_{p_1} = 0$) \Rightarrow течет ток по цепи $m \rightarrow V_1 \rightarrow R_n \rightarrow n \rightarrow m$

Величина тока $i_H' = i_{V_1}' = u_{2\sim}' / (R_{v1}' + R_n) = u_{2\sim}' / R_n$ ($R_{v1}' = R_{p_1} = 0$)

Напряжение на нагрузке $U_H' = i_H' R_n = u_{2\sim}'$

2-й полупериод

в (.) m “-” \Rightarrow - на аноде $V_1 \Rightarrow \varphi_A < \varphi_K \Rightarrow V_1$ – закрыт ($R_{v1}'' = R_{o_1} = \infty$) \Rightarrow ток в цепи и напряжение на нагрузке равны 0.

$$i_H'' = i_{V_1}'' = 0; u_H'' = 0$$

В $1\pi/\text{пер}$ ВУ ток и напряжение на нагрузке существует только половину периода (когда вентиль открыт).

Обратное напряжение на закрытом вентиле – из II закона Кирхгофа $u_{2\sim} = u_{V_1}'' + u_H''$ ($u_H'' = 0$) $\Rightarrow u_{V_1}'' = u_{2\sim}$ – напряжение на закрытом вентиле равно выпрямляемому напряжению, а его максимальное

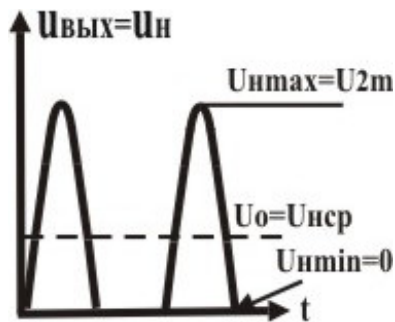
значение $U_{обр\ макс} = U_{2m}$ – амплитуде выпрямляемого напряжения (в $\sqrt{2}$ раз больше его действующего значения).

Основные параметры схемы:

1. Постоянная составляющая выходного напряжения

$$U_{нсп} = \frac{1}{T} \int_0^T u_H(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} U_{2m} \sin(\omega t) dt + \int_{T/2}^T 0 dt = \frac{U_{2m}}{\pi}$$

2. Коэффициент пульсации K_p



$$U_{max} = U_{2m}; U_{min} = 0 \Rightarrow \Delta U_H = (U_{max} - U_{min})/2 = U_{2m}/2$$

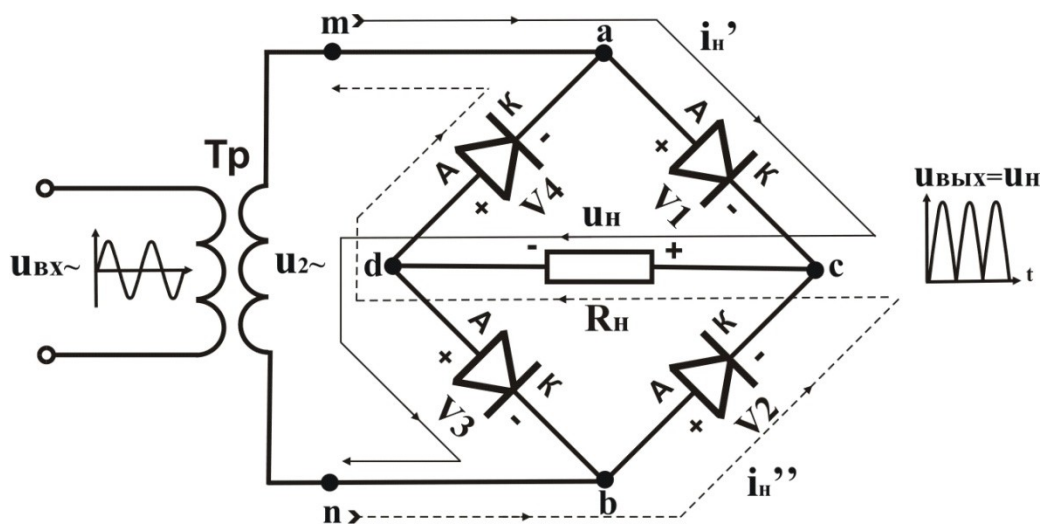
$$K_p = \Delta U_H / U_{нсп} = (U_{2m}/2) / (\pi/U_{2m}) = \pi / 2 = 1.57$$

– переменная составляющая выходного напряжения больше постоянной. ($K_p = 157\%$)

Достоинства и недостатки:

- (+) простота, всего один вентиль,
- (-) половину периода нет тока,
- (-) большой K_p ,
- (-) частота пульсации $f_{п} = f_1$ – частоте сети.

Двухполупериодная мостовая схема ВУ



Работа схемы:

1-й полупериод «+» в (.) $m \Rightarrow +$ на анодах V1 и V3 \Rightarrow V1 и V3 – открыты ($R_{пр}=0$)

«-» в (.) $n \Rightarrow -$ на анодах V2 и V4 \Rightarrow V2 и V4 – закрыты ($R_{обр} = \infty$)

Течет ток по цепи $m - a - V1 - c - R_H - d - V3 - b - n$
 Величина тока $i_H' = u_{2\sim}' / R_H$ ($R_{v1}' = R_{v3}' = R_{пр}=0$)
 Напряжение на нагрузке $u_H' = i_H' R_H = u_{2\sim}'$

2-й полупериод «-» в (.) $m \Rightarrow -$ на анодах V1 и V3 \Rightarrow V1 и V3 – закрыты ($R_{обр} = \infty$)

«+» в (.) $n \Rightarrow +$ на анодах V2 и V4 \Rightarrow V2 и V4 – открыты ($R_{пр}=0$)

Течет ток по цепи $n - b - V2 - c - R_H - d - V4 - a - m$
 Величина тока $i_H'' = u_{2\sim}'' / R_H$ ($R_{v2}'' = R_{v4}'' = R_{пр}=0$)
 Напряжение на нагрузке $u_H'' = i_H'' R_H = u_{2\sim}''$

Следовательно, ток в нагрузке и напряжение на нагрузке существуют оба полупериода $i_H = i_H' + i_H''$ $u_H = u_H' + u_H'' = u_{2\sim}$ ($u_{2\sim}' = u_{2\sim}'' = u_{2\sim}$)

Обратное напряжение на закрытом вентиле – из II закона Кирхгофа $u_{2\sim} = u_{v1}' + u_{v2}'$ V1 – открыт $\Rightarrow u_{v1}' = 0 \Rightarrow u_{v2}' = u_{2\sim}$ – напряжение на закрытом вентиле равно напряжению на вторичной обмотке трансформатора $u_{2\sim}$, а его максимальное значение $U_{обр макс} = U_{2m}$ – амплитуде выпрямляемого напряжения (в $\sqrt{2}$ раз больше действующего).

Основные параметры схемы:

1. $U_0 = U_{нср} = 2(U_{2m} / \pi)$ – в два раза больше чем в однополупериодной – ток и напряжение на нагрузке существуют оба полупериода
2. Коэффициент пульсации $K_{п} = ?$ $(\pi/2) = (\pi/4)$ – в два раза меньше, чем в однополупериодной (пульсация та же, а U_0 в два раза больше)

Достоинства (+) и недостатки (-) двухполупериодной схемы по сравнению с однополупериодной:

- (+) ток и напряжение на нагрузке существуют оба полупериода
- (+) U_0 в два раза больше,
- (+) $K_{п}$ – в два раза меньше
- (+) частота пульсации $f_{п} = 2f_1$ – в 2 раза больше частоты сети
- (-) нужны 4 вентиля, а не 1.




Фильтры выпрямителей

Предназначены для уменьшения коэффициента пульсации выпрямленного напряжения (K_p), т.е. для уменьшения отношения его переменной составляющей к постоянной.



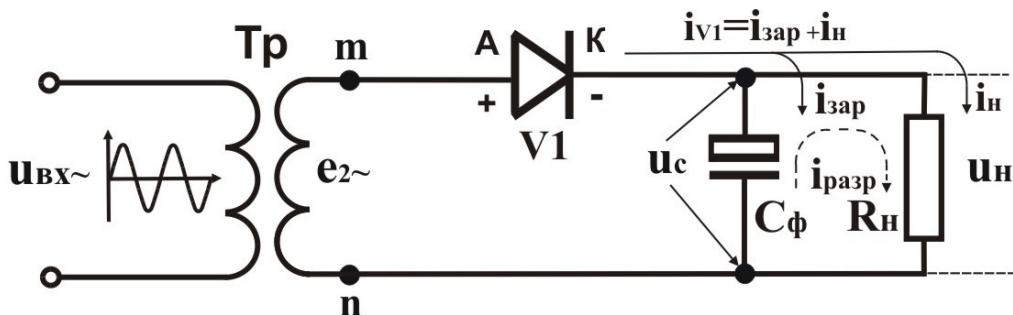
Коэффициент фильтрации $K_f = (K_{пвх} / K_{пвых})$ – показывает, во сколько раз фильтр уменьшает K_p .

В качестве элементов фильтров используются комбинации R, L, C , т.к. их сопротивление различно для постоянного и переменного тока.

| Элемент | Сопротивление элемента | |
|---|------------------------|---|
| | Пост. ток $f=0$ | Перем. ток $f=f_{\text{сети}}$ (или $2f_{\text{сети}}$) |
|  R | R | R |
|  $X_L = 2\pi fL$ | 0 | X_L |
|  $X_C = 1 / 2\pi fC$ | ∞ | X_C |

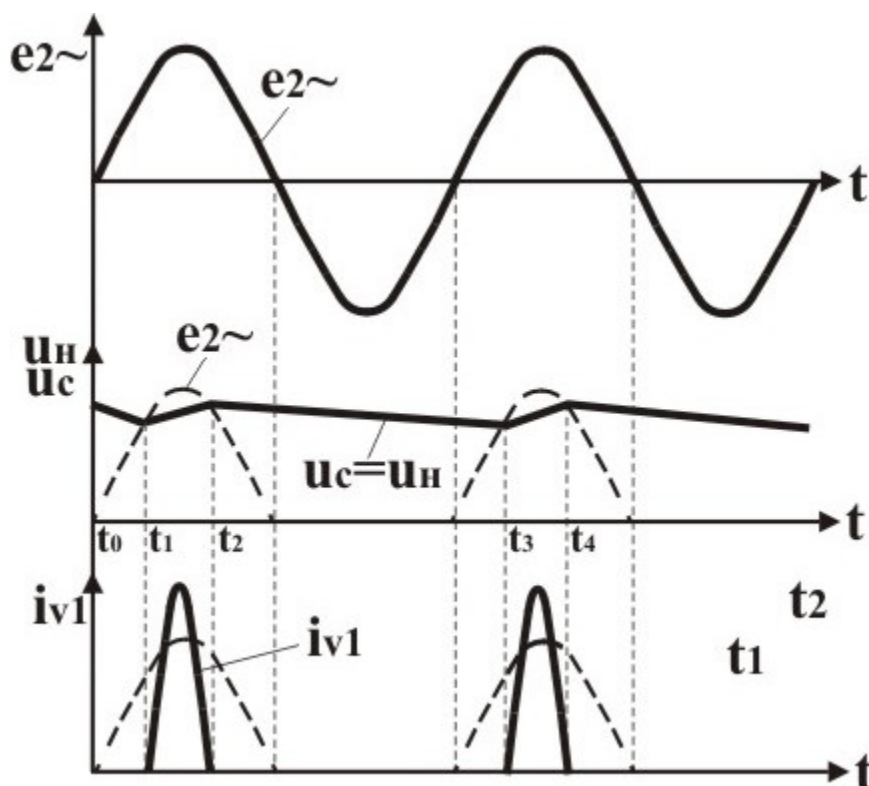
Фильтр должен пропускать постоянный ток и не пропускать переменный, поэтому элементы с большим сопротивлением переменному току (R, L) включаются последовательно с нагрузкой, а C – всегда параллельно.

Принцип действия емкостного фильтра



Работа емкостного фильтра основана на способности конденсатора накапливать заряд. При открытом вентиле конденсатор C_f заряжается

(накапливает заряд), при закрытом V1, конденсатор разряжается через нагрузку и создает в ней ток и падение напряжения.



Интервал $t_0 - t_1$ в (.) м «+», но $e_{2\sim} < u_C \Rightarrow$ «+» на аноде V1 < «+» на катоде V1 ($\varphi_A < \varphi_K$) \Rightarrow клапан V1 закрыт и конденсатор Cф продолжает разряжаться, $\Rightarrow u_C \downarrow$

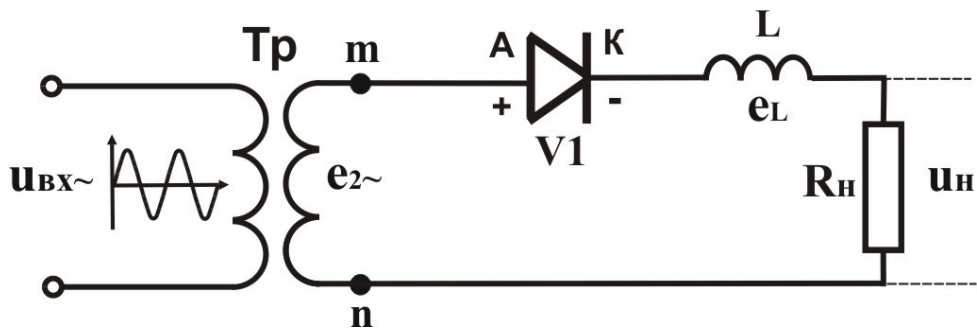
Интервал $t_1 - t_2$ в (.) м «+», и $e_{2\sim} > u_C \Rightarrow$ «+» на аноде V1 > «+» на катоде V1 \Rightarrow ($\varphi_A > \varphi_K$) клапан V1 открыт, через него течет ток $i_V = i_{ЗАР} + i_H$
 i_H создает напряжение на нагрузке
 $i_{ЗАР}$ заряжает конденсатор Cф, напряжение на нем растет ($u_H = u_C \uparrow$)

Интервал $t_2 - t_3$ $e_{2\sim} < u_C \Rightarrow$ клапан V1 закрыт и конденсатор Cф разряжается через нагрузку создавая на R_H падение напряжения $u_H = i_{РАЗ}R_H$, напряжение на Cф уменьшается ($u_H = u_C \downarrow$)

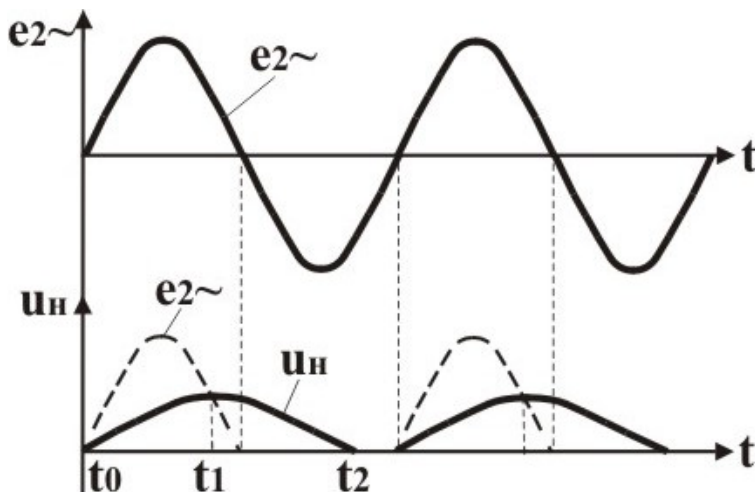
Дальше процесс повторяется.

Скорость заряда конденсатора определяется его емкостью Cф и сопротивлением цепи заряда ($R_{тр}, R_{v1}$), а скорость разряда – емкостью Cф и током нагрузки (сопротивлением R_H) \Rightarrow емкостной фильтр хорошо работает при малых токах нагрузки – в слаботочных ВУ.

Принцип действия индуктивного фильтра



При любом изменении тока в катушке индуктивности L возникает ЭДС самоиндукции $e_L = -L \, di/dt$ (закон Фарадея), направленная так, чтобы сглаживать (уменьшать) любое изменение тока (правило Ленца).



При увеличении тока (интервал $t_0 - t_1$) ЭДС самоиндукции e_L направлена навстречу $e_{2~}$ и $u_H = e_{2~} - e_L < e_{2~}$

При уменьшении тока (интервал $t_1 - t_2$) ЭДС самоиндукции e_L меняет знак и начинает складываться с $e_{2~}$ т.е. $u_H = e_{2~} + e_L > e_{2~}$

Амплитуда импульса напряжения на нагрузке u_H уменьшается, длительность импульса увеличивается \Rightarrow K_p уменьшается.

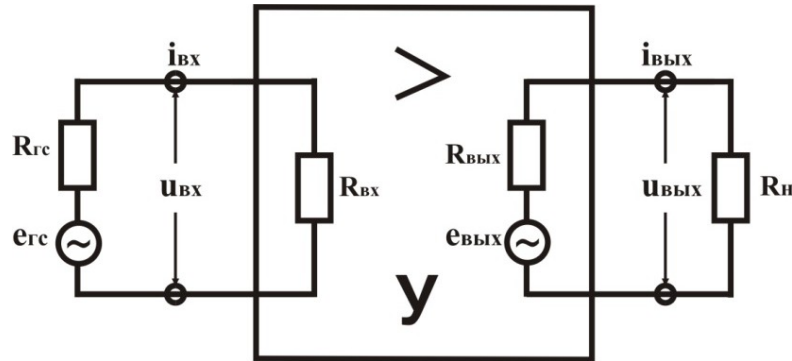
Индуктивные фильтры обычно используются при больших токах нагрузки, т.е. в силовых ВУ.

ТЕМА 9 УСИЛИТЕЛИ

Назначение усилителя (У) – увеличение мощности электрических сигналов за счет энергии источников постоянного тока.

Основные параметры и характеристики усилителя

Эквивалентная схема усилителя



Любой источник сигнала можно заменить эквивалентным генератором (ГС) с ЭДС $e_{Гс}$ и внутренним сопротивлением $R_{Гс}$
 $u_{ВХ}$, $u_{ВЫХ}$, $i_{ВХ}$, $i_{ВЫХ}$ – входные и выходные напряжения и токи
 $R_{ВХ}$, $R_{ВЫХ}$ – входное и выходное сопротивления
 $e_{ВЫХ}$ – выходная ЭДС усилителя

Основные параметры:

1. Коэффициенты усиления
 по напряжению – $K_U = u_{ВЫХ} / u_{ВХ}$
 по току – $K_I = i_{ВЫХ} / i_{ВХ}$
 по мощности – $K_P = p_{ВЫХ} / p_{ВХ} = K_U K_I$
2. Входное сопротивление $R_{ВХ}$ – определяет реальный входной сигнал

$$u_{ВХ} = i_{ВХ} R_{ВХ} = \frac{e_{Гс}}{R_{Гс} + R_{ВХ}} R_{ВХ}$$

если $R_{ВХ} \ll R_{Гс}$ то $u_{ВХ} \ll e_{Гс}$

если $R_{ВХ} \gg R_{Гс}$ то $u_{ВХ} \cong e_{Гс}$

3. Выходное сопротивление $R_{ВЫХ}$ – определяет реальный выходной сигнал

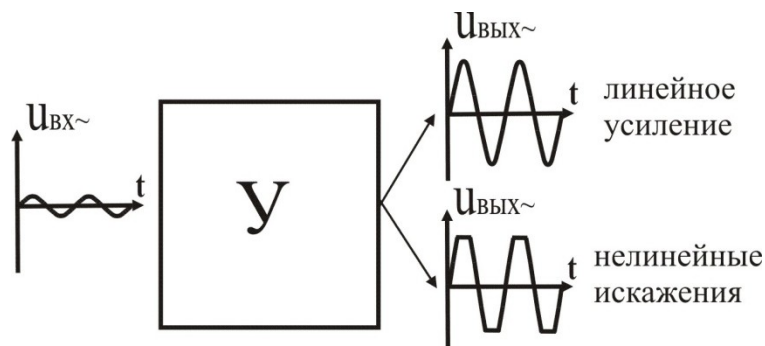
$$u_{ВЫХ} = i_{ВЫХ} R_{Н} = \frac{e_{ВЫХ}}{R_{ВЫХ} + R_{Н}} R_{Н}$$

если $R_{ВЫХ} \gg R_{Н}$ то $u_{ВЫХ} \ll e_{ВЫХ}$

если $R_{ВЫХ} \ll R_{Н}$ то $u_{ВЫХ} \cong e_{ВЫХ}$

Следовательно, хороший усилитель должен иметь большое $R_{вх}$ и малое $R_{вых}$, точнее $R_{вх} \gg R_{гс}$, а $R_{вых} \ll R_{н}$

4. Коэффициент нелинейных искажений $K_{НИ}$ (%) (коэффициент гармоник $K_{Г}$ – учитывает нелинейные искажения (НИ) – искажения формы сигнала в процессе усиления.



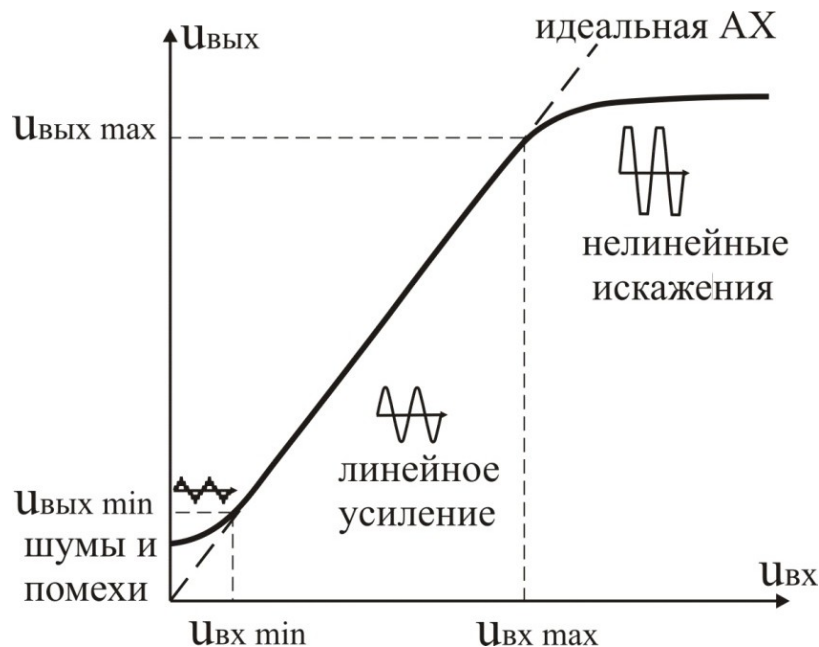
$$K_{НИ} = K_{Г} = \sqrt{\frac{P_2 + P_3 + P_4 \dots}{P_1}} = \sqrt{\frac{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 \dots}{U_1^2}}$$

5. Динамический диапазон D (см. АХ).

6. Полоса пропускания – Δf (см. АЧХ).

Характеристики:

1. Амплитудная характеристика (АХ) – зависимость выходного напряжения от входного $u_{вых} = f(u_{вх})$



Динамический диапазон $D = u_{вх\ max} / u_{вх\ min} = u_{вых\ max} / u_{вых\ min}$ – диапазон изменения $u_{вх}$, в котором шумы и нелинейные искажения не превышают допустимых значений.

2. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) – зависимость коэффициента усиления от частоты $K_f = F(f)$ при постоянном $U_{вх}$



Полоса пропускания – $\Delta f = f_B - f_H$ – диапазон частот, в пределах которого K_U уменьшается не более чем в $\sqrt{2}$ раз.

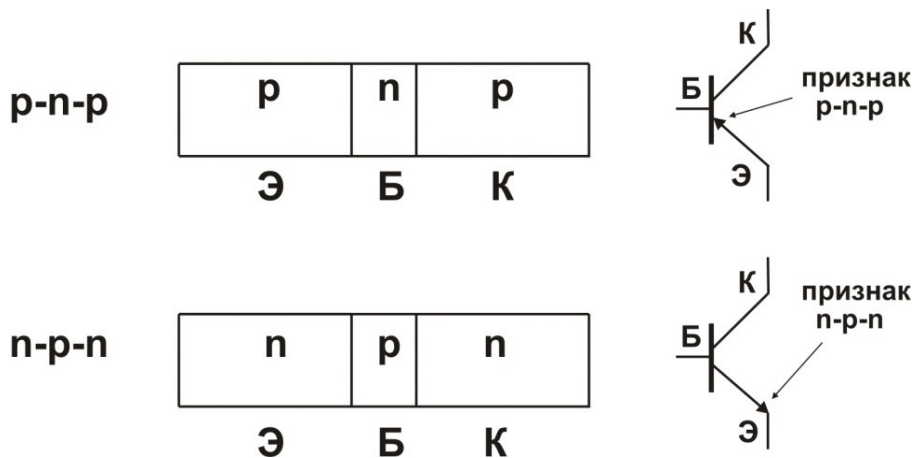
Принцип действия биполярных транзисторов

В биполярных транзисторах (БПТ) используются полупроводники (п/п) двух типов:

n-типа – с электронной проводимостью \ominus

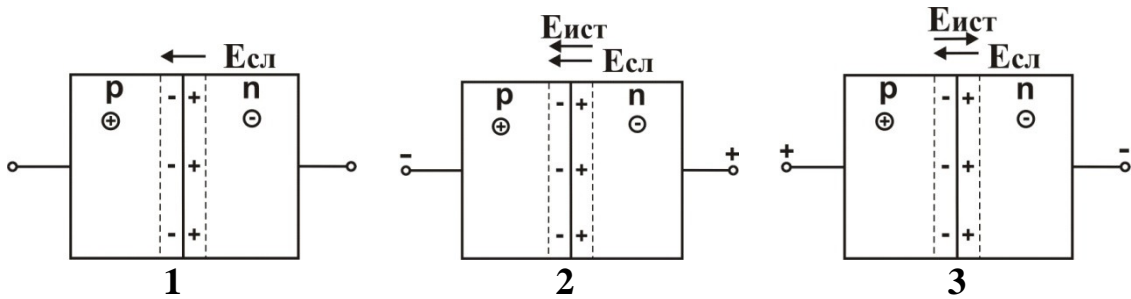
p-типа – с дырочной проводимостью \oplus

Структура БПТ – два p-n перехода, возникающие на границе раздела п/п с различным типом проводимости.



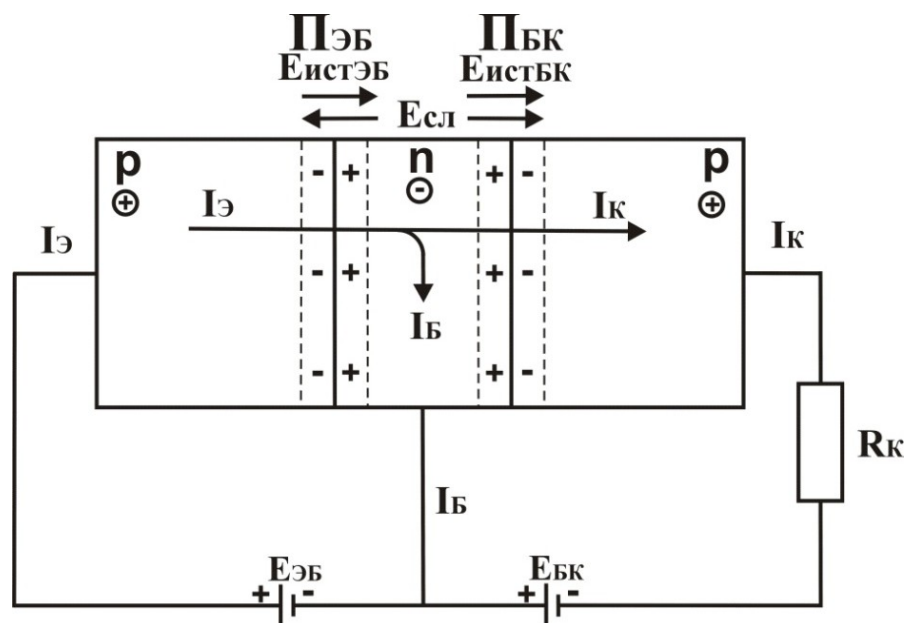
Э – эмиттер Б – база К – коллектор

р-п переход



1. Из-за диффузии и рекомбинации электронов и дырок на р-п переходе возникает двойной электрический слой, т.е. – потенциальный барьер. Электрическое поле этого слоя $E_{сл}$ препятствует движению основных носителей через переход, т.е. переход самозакрывается.
2. Если поле внешнего источника $E_{ист}$ совпадает по направлению с $E_{сл}$, источник еще больше закрывает переход – тока нет.
3. Если $E_{ист}$ направлено навстречу $E_{сл}$, то переход приоткрывается и часть носителей, энергия которых больше барьера, проходит через переход, течет ток основных носителей, величина которого зависит от $E_{ист}$, т.е. от управляющего напряжения на переходе.

Принцип действия БПТ в схеме с общей базой (ОБ)



Без внешних источников – оба перехода закрыты за счет $E_{сл}$.

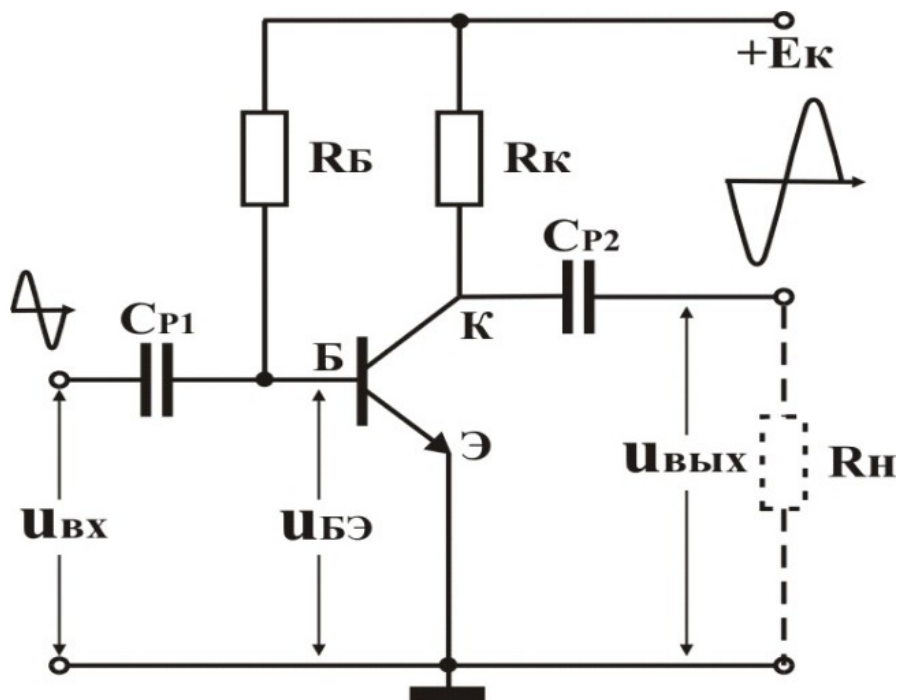
На переходе база – коллектор ($\Pi_{БК}$) $E_{ПБК} = E_{СЛ} + E_{ИСТ\ БК} \Rightarrow \Pi_{БК}$ – еще больше закрыт для основных носителей (\oplus в К и \ominus в Б).

На переходе эмиттер – база ($\Pi_{ЭБ}$) $E_{ПЭБ} = E_{СЛ} - E_{ИСТ\ ЭБ}$ т.е. $\Pi_{БК}$ – приоткрыт, часть дырок, энергия которых больше барьера, может пройти через $\Pi_{ЭБ}$ в базу, создавая ток эмиттера $I_{Э}$. В базе часть дырок \oplus рекомбинирует с электронами \ominus создавая ток базы $I_{Б}$, но база тонкая, концентрация \ominus мала, поэтому мала вероятность рекомбинации и основная часть дырок, через открытый для них $\Pi_{БК}$ попадает в коллектор, создавая ток коллектора $I_{К}$

$$I_{Э} = I_{Б} + I_{К} \quad I_{Б} \ll I_{Э} \quad \Rightarrow \quad I_{К} = I_{Э} - I_{Б} \cong I_{Э}$$

Принцип усиления: Если на управляющий переход $\Pi_{ЭБ}$ подать переменный сигнал $u_{вх\sim}$, то напряжение на управляющем переходе будет изменяться \Rightarrow будет изменяться высота барьера \Rightarrow будут меняться токи $I_{Э}$, $I_{Б}$ и $I_{К} \cong I_{Э}$. Если к цепь коллектора включить резистор $R_{К}$, то изменяющийся $I_{К}$ создаст на нем переменное падение напряжения, т.е. переменный выходной сигнал $u_{вых\sim}$. При достаточно большом $R_{К}$, $u_{вых\sim} > u_{вх\sim}$, – т.е. получим усиление по напряжению. В схеме с ОБ $k_U > 1$; $k_I < 1$.

Схема усилителя с общим эмиттером (ОЭ) Назначение элементов схемы

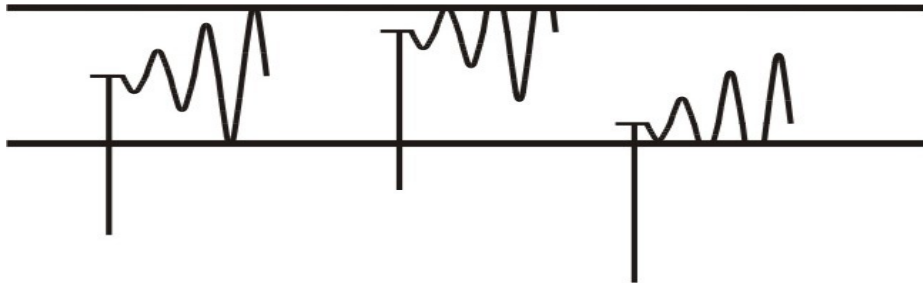


Назначение элементов схемы:

$E_{К}$ – ЭДС постоянного источника питания.

R_K – на этом резисторе при изменении I_K создается переменное падение напряжение, т.е. усиленный выходной сигнал.

R_B – через этот резистор на управляющий переход $\Pi_{ЭБ}$ от E_K подается постоянное напряжение $U_{БЭ0}$, которое приоткрывает переход. Изменяя R_B можно изменить $U_{БЭ0}$, т.е. режим покоя БПТ. Обычно переход полуоткрыт, в этом случае можно получить без искажений максимальный выходной сигнал (первый вариант на следующем рисунке).



C_{P1} и C_{P2} – разделительные конденсаторы, пропускают только переменный сигнал и не пропускают постоянный. C_{P1} не пропускает постоянное напряжение со входа на управляющий переход $\Pi_{ЭБ}$ (чтобы не изменялся режим покоя БПТ), а C_{P2} – с коллектора БПТ в нагрузку.

Работа схемы:

Без сигнала $U_{БЭ0}$ приоткрывает управляющий переход $\Pi_{ЭБ}$ и текут токи покоя $I_{Э0}$ и $I_{K0} \cong I_{Э0}$.

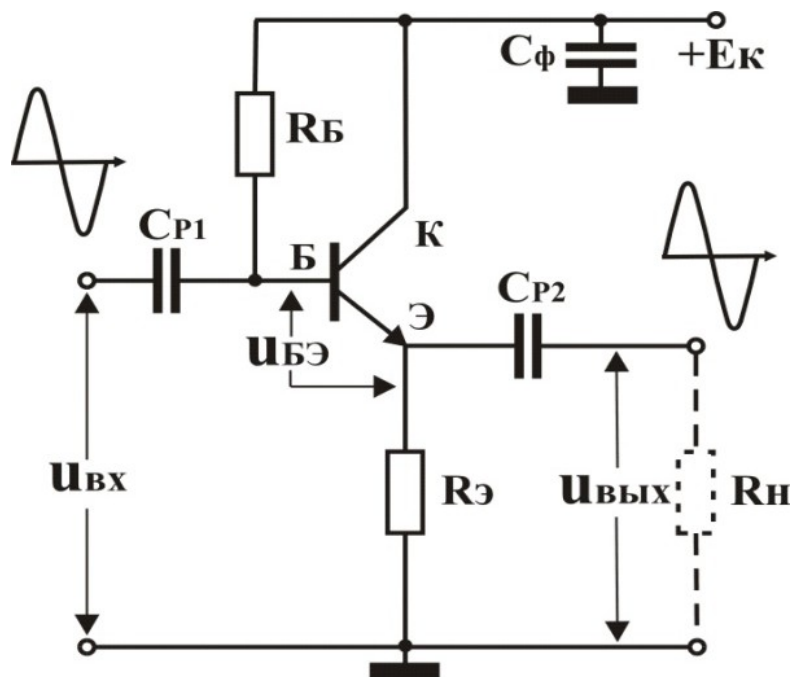
Если есть входной сигнал, то $u_{вх}$ складывается с $U_{БЭ0}$, $\Rightarrow U_{БЭ} = U_{БЭ0} + u_{вх}$ – изм., \Rightarrow изм. высота барьера \Rightarrow изм. токи $I_{Э}$, I_B и $I_K \cong I_{Э} \Rightarrow$ изм. $u_{R_K} = I_K R_K \Rightarrow$ изм. $u_{вых} = U_K = E_K - I_K R_K$ Переменная составляющая через C_{P2} подается в нагрузку.

Если $u_{вх}$ увеличивается (\uparrow) то $\Pi_{ЭБ}$ приоткрывается $\Rightarrow \uparrow I_{Э}$, I_B и $I_K \cong I_{Э} \Rightarrow u_{R_K} = I_K R_K \uparrow \Rightarrow U_K = u_{вых} = (E_K - u_{R_K}) \downarrow$ – т.е. при $\uparrow u_{вх}$, $u_{вых} \downarrow \Rightarrow$ в схеме с ОЭ выходной сигнал в противофазе с входным, т.е. ОЭ переворачивает фазу усиливаемого сигнала на 180^0 .

Основные параметры (достоинства и недостатки):

- (+) $K_U \gg 1$;
- (+) $K_I \gg 1$;
- (+) $K_P \gg 1$
- (-) сравнительно малое $R_{вх}$ и большое $R_{вых}$

Усилитель с общим коллектором (ОК)



Назначение элементов схемы:

C_{Φ} – конденсатор большой емкости (конденсатор фильтра источника питания) – соединяет по переменному току коллектор БПТ с общим проводом схемы \perp , относительно которого подается $u_{ВХ}$ и снимается $u_{ВЫХ}$

E_K , R_B , C_{P1} и C_{P2} – см. схему с ОЭ

$R_{Э}$ – на этом резисторе $I_{Э}$ создает переменное падение напряжение, т.е. переменный выходной сигнал.

Работа схемы – см. ОЭ, но

- $u_{ВЫХ}$ создается на $R_{Э}$, а не на R_K , как в ОЭ.
- При увеличении (\uparrow) $u_{ВХ}$, $P_{ЭБ}$ приоткрывается $\Rightarrow I_{Э}$, I_B и $I_K \cong I_{Э} \uparrow \Rightarrow u_{Э} = I_{Э}R_{Э} \uparrow \Rightarrow u_{ВЫХ} = u_{Э} \uparrow$ – т.е. при $\uparrow u_{ВХ}$ $u_{ВЫХ}$ тоже $\uparrow \Rightarrow$ в схеме с ОЭ $u_{ВЫХ}$ совпадает по фазе с $u_{ВХ}$ и почти равно ему по величине – отсюда второе название – эмиттерный повторитель.

$$u_{ВЫХ} = u_{ВХ} - u_{БЭ} \quad u_{БЭ} \ll u_{ВХ} \Rightarrow u_{ВЫХ} \cong u_{ВХ}$$

Основные параметры (+ и –):

(–) $K_U < 1$ (0.95 – 0.99) – нет усиления по напряжению

(+) $K_I \gg 1$; $K_P \gg 1$

(++) большое $R_{ВХ}$ ($R_{ВХ \text{ ОК}} > R_{ВХ \text{ ОЭ}}$) и малое $R_{ВЫХ}$ ($R_{ВЫХ \text{ ОК}} < R_{ВЫХ \text{ ОЭ}}$) – поэтому часто используется в качестве первого или последнего каскада в многокаскадных усилителях, если нужно обеспечить большое $R_{ВХ}$ или малое $R_{ВЫХ}$.

ТЕМА 10 МНОГОКАСКАДНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Назначение многокаскадных усилителей (МКУ) – для получения больших коэффициентов усиления несколько усилителей включаются последовательно.

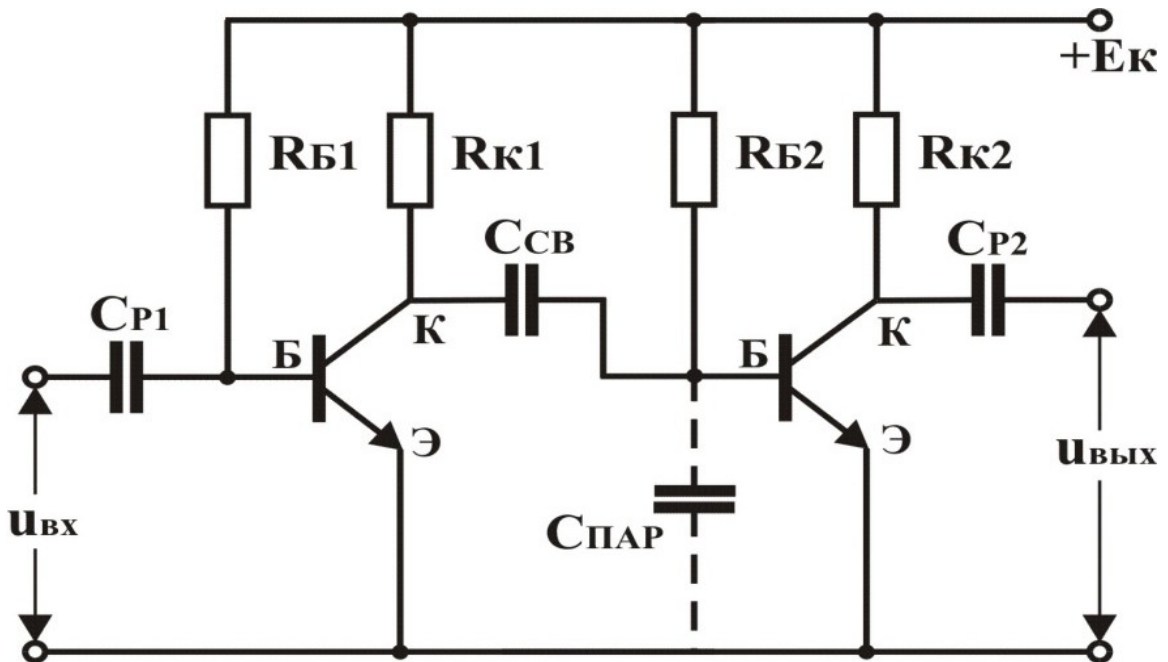
Сигнал от одного усилителя к другому передается через четырехполюсник связи (ЧПСв).

Тип ЧПСв во многом определяет свойства усилителя, особенно K_U и АЧХ.

Виды связи между каскадами:

1. Резистивно-емкостная – RC-связь (см. усилители с RC-связью)
2. Трансформаторная – обеспечивает наилучшее согласование $R_{ВЫХ}$ с $R_{ВХ}$ следующего каскада, но имеет узкую и неравномерную АЧХ. (используется все реже).
3. Гальваническая связь – (см. усилители с гальванической связью УГС).

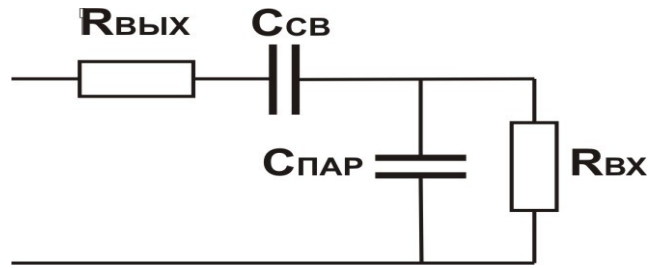
Усилители с RC связью



Назначение элементов и принцип действия – см. ОЭ.

Помимо конденсаторов C_{P1} , C_{CB} , C_{P2} в любой схеме есть паразитные емкости $C_{пар}$ – это емкость монтажа, емкости переходов БПТ и т.д., которые включены параллельно со входом.

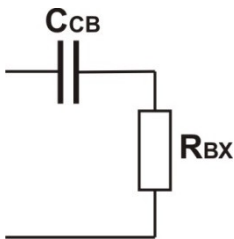
Эквивалентная схема RC-связи



Область Н.Ч.

$$X_{C_{СВ}} \gg R_{ВЫХ}$$

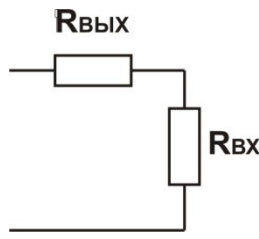
$$X_{C_{ПАР}} \gg R_{ВХ}$$



Область Ср.Ч.

$$X_{C_{СВ}} \ll R_{ВЫХ}$$

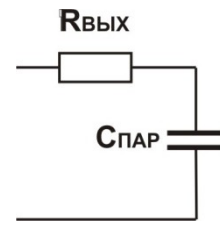
$$X_{C_{ПАР}} \gg R_{ВХ}$$



Область В.Ч.

$$X_{C_{СВ}} \ll R_{ВЫХ}$$

$$X_{C_{ПАР}} \ll R_{ВХ}$$



Особенности АЧХ:



Уменьшение усиления – завал АЧХ – на низких частотах (Н.Ч.).

При уменьшении частоты сопротивление последовательных конденсаторов C_{P1} $C_{СВ}$ C_{P2} увеличивается ($X_C = 1/2\pi fC$) и в области Н.Ч. X_C становится соизмеримо с $R_{ВХ}$, начинает расти падение напряжения сигнала на этих конденсаторах, т.е. все меньшая часть сигнала передается через них на вход следующего каскада \Rightarrow реальное входное напряжение $\downarrow \Rightarrow U_{ВЫХ} \downarrow \Rightarrow K_f \downarrow$

Чтобы расширить Δf в области Н.Ч., т.е. уменьшить завал АЧХ на Н.Ч., нужно либо \uparrow емкость C_{P1} $C_{СВ}$ C_{P2} , либо $\uparrow R_{ВХ}$.

Уменьшение усиления – завал АЧХ – на высоких частотах (В.Ч.).

С ростом частоты уменьшается (\downarrow) сопротивление $C_{\text{пар}}$ и в области В.Ч. эти емкости начинают шунтировать (закорачивать) вход усилителя. Реальный входной сигнал $\downarrow \Rightarrow U_{\text{ВЫХ}} \downarrow \Rightarrow K_f \downarrow$

Чтобы расширить Δf в области В.Ч., т.е. уменьшить завал АЧХ на В.Ч., нужно либо \downarrow емкость $C_{\text{пар}}$, или $\downarrow R_{\text{ВЫХ}}$ предыдущего каскада.

Горизонтальный участок АЧХ – конденсаторы C_{P1} C_{CB} C_{P2} и $C_{\text{пар}}$ не влияют на АЧХ – их сопротивление уже $\ll R_{\text{ВЫХ}}$, а сопротивление $C_{\text{пар}}$ еще $\gg R_{\text{ВХ}}$.

Достоинства и недостатки усилителя с RC-связью:

- (+) малые габариты, вес, стоимость
- (+) полное разделение каскадов по постоянному току
- (-) завал АЧХ на Н.Ч. – нельзя усиливать низкочастотные сигналы.

Усилители с гальванической связью (УГС) (Усилители постоянного тока – УПТ)

Для усиления Н.Ч. сигналов АЧХ не должна иметь завала на Н.Ч. \Rightarrow в схеме усилителя не может быть конденсаторов и трансформаторов.

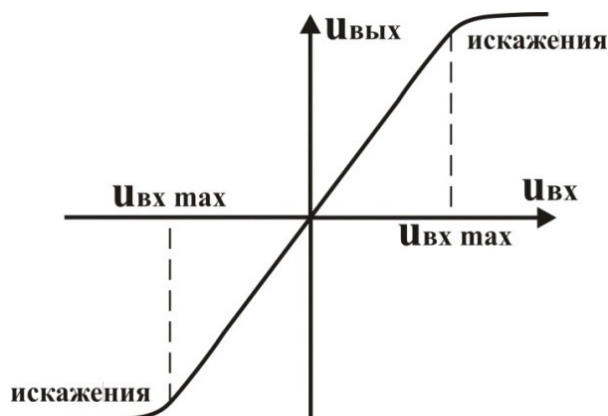
Особенности УГС:

1. Нет завала АЧХ на Н.Ч.

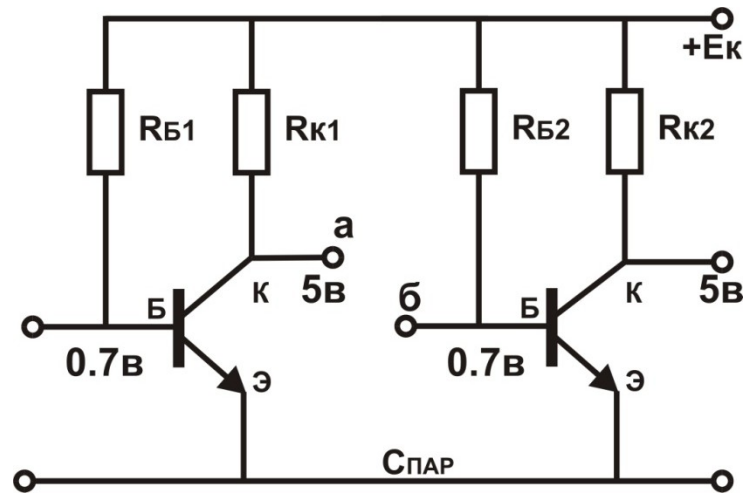


Завал на В.Ч. – как у усилителя с RC-связью

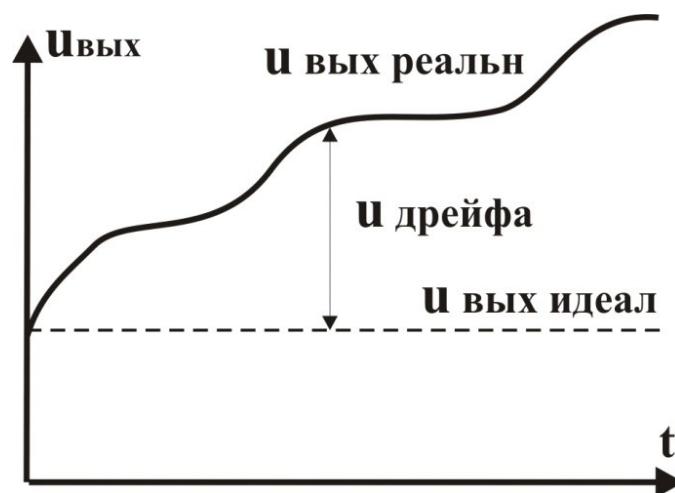
2. АХ УГС имеет две ветви $U_{\text{ВХ}}$ и $U_{\text{ВЫХ}}$ может быть > 0 и < 0



3. Возникает проблема согласования потенциалов покоя – постоянное напряжение на коллекторе предыдущего каскада не равно напряжению на базе следующего – нельзя непосредственно соединить точки «а» и «б».



4. Дрейф нуля УГС – медленное изменение $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{К}} = E_{\text{К}} - I_{\text{К}}R_{\text{К}}$ при постоянном $U_{\text{ВХ}}$.

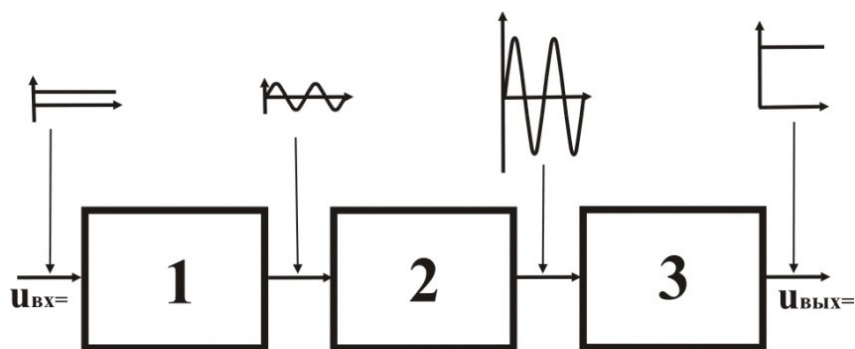


Причины дрейфа:

1. Изменение $E_{\text{К}}$
2. Изменение параметров элементов схемы
 - А) из-за старения элементов.
 - Б) из-за изменения температуры (особенно для БПТ).

Способы борьбы с дрейфом:

1. Стабилизация источников питания.
2. Искусственное старение элементов.
3. Термостатирование или термостабилизация.
4. УГС с преобразованием сигнала.

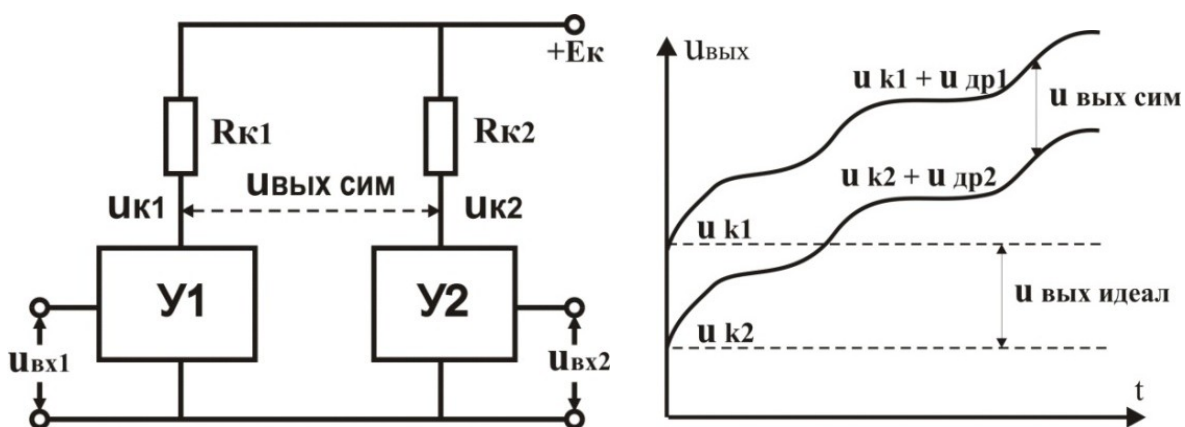


1. Модулятор – преобразует постоянный сигнал в переменный
2. Усилитель переменного сигнала (с RC-связью)
3. Демодулятор – преобразует усиленный переменный сигнал в постоянный

Для усилителя с RC-связью дрейф не страшен, так, как дрейф – это сигнал Н.Ч. ($f \cong 0 \Rightarrow K_f \cong 0$) – не усиливается.

5. Применение балансных схем УГС

Два одинаковых усилителя, на входе одного – усиливаемый сигнал, на входе второго – постоянное опорное напряжение. Выходной сигнал $U_{\text{ВЫХ СИМ}}$ снимается **между** выходами этих усилителей



$$u_{\text{ВЫХ СИМ}} = u_{K1} + u_{\text{др1}} - (u_{K2} + u_{\text{др2}}) = (u_{K1} - u_{K2}) + (u_{\text{др1}} - u_{\text{др2}}) \cong u_{\text{ВЫХ ИД.}}$$

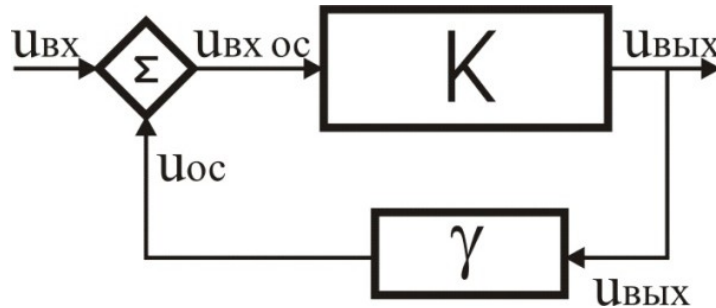
Если усилители одинаковые, то дрейф тоже практически одинаков и почти полностью компенсируется ($u_{\text{др1}} - u_{\text{др2}} \approx 0$).

Достоинства и недостатки УГС (+ и –)

- (+) нет завала на Н.Ч.
- (–) дрейф нуля.

Обратные связи в усилителях (ОС)

Передача сигнала с выхода усилителя или его части на вход называется обратной связью.



$$u_{\text{ВХ ОС}} = u_{\text{ВХ}} \pm u_{\text{ОС}} \quad u_{\text{ОС}} = \gamma u_{\text{ВЫХ}}$$

γ – коэффициент передачи ЧП обратной связи

Положительная обратная связь (ПОС, +ОС) – сигнал ОС совпадает по фазе с входным, т.е. складывается с ним
 $u_{\text{ВХ ОС}} = u_{\text{ВХ}} + u_{\text{ОС}} \Rightarrow u_{\text{ВХ}} \uparrow \Rightarrow u_{\text{ВЫХ}} \uparrow \Rightarrow K_U \uparrow \Rightarrow$ ПОС увеличивает усиление.

Отрицательная обратная связь (ООС, –ОС) – сигнал ОС в противофазе с входным, т.е. вычитается из него
 $u_{\text{ВХ ОС}} = u_{\text{ВХ}} - u_{\text{ОС}} < u_{\text{ВХ}} \Rightarrow u_{\text{ВЫХ}} \downarrow \Rightarrow K_U \downarrow \Rightarrow$ ООС уменьшает усиление.

$$K_{\text{ОС}} = \frac{K}{1 - \gamma K} \text{ – коэффициент усиления усилителя с ОС}$$

$K_{\text{ОС}}$ – коэффициент усиления усилителя с ОС

K – коэффициент усиления усилителя без ОС

γ – коэффициент передачи ЧПос $u_{\text{ОС}} = \gamma u_{\text{ВЫХ}}$

ПОС $\gamma > 0$ $K_{\text{ПОС}} > K$ – применяется в генераторах

ООС $\gamma < 0$ $K_{\text{ООС}} < K$ – применяется в усилителях

Влияние ООС на параметры и характеристики усилителя

ООС уменьшает усиление, но улучшает все остальные параметры усилителя (ПОС – наоборот):

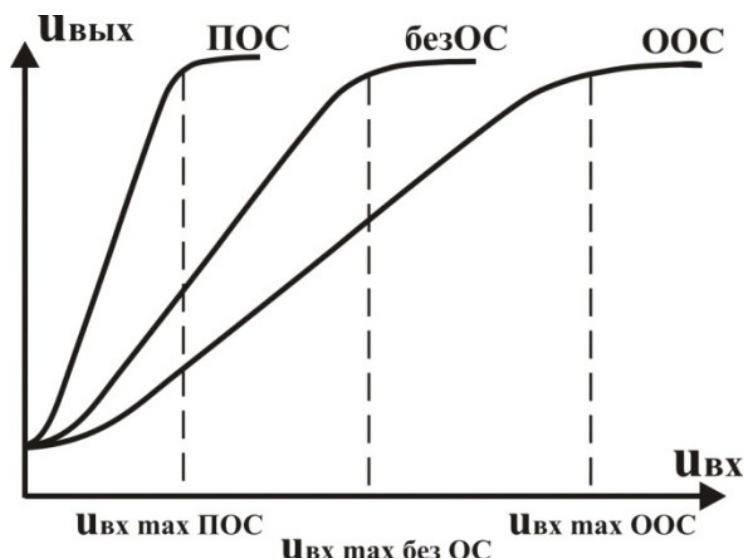
(–) $K_{\text{ООС}} < K$ – ООС уменьшает усиление.

(+) 1. ООС повышает стабильность коэффициента усиления.

2. ООС увеличивает $R_{\text{ВХ}}$.

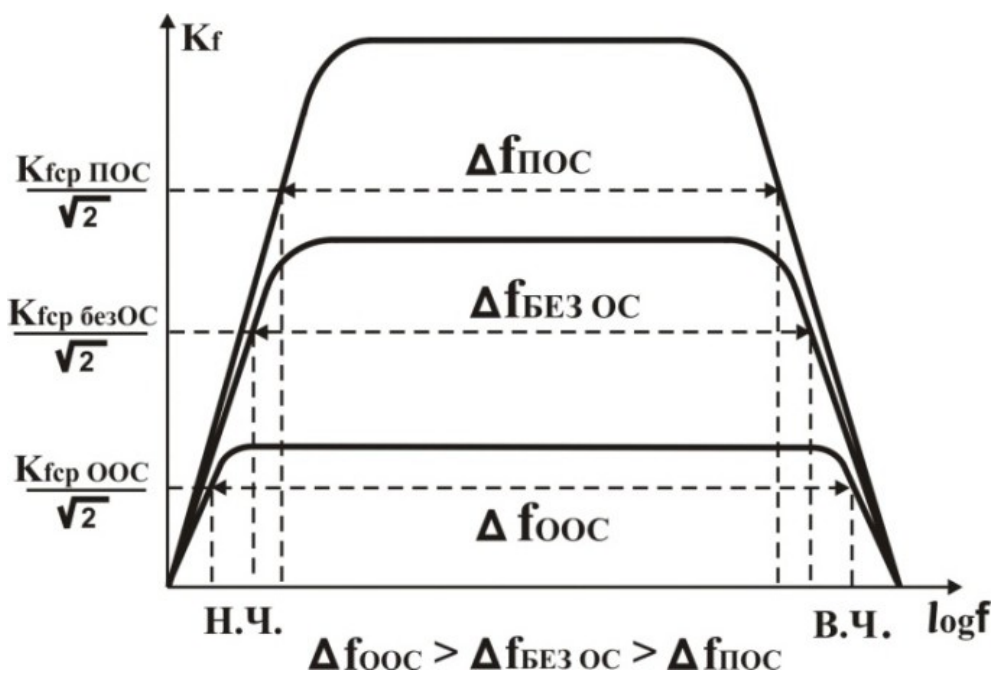
3. ООС уменьшает $R_{\text{ВЫХ}}$.

4. ООС увеличивает динамический диапазон D (уменьшает Н.И.).



Реальный сигнал на входе усилителя $u_{вх \text{ ООС}} = u_{вх} - u_{оос} \rightarrow$ ПОЭТОМУ Н.И. начинаются при больших $u_{вх}$.

5. ООС расширяет полосу пропускания Δf



ООС увеличивает $R_{вх}$ и уменьшает $R_{вых}$, поэтому влияние последовательных $C_{св}$ проявится на более низкой частоте ($f_{н \text{ ООС}} < f_n$), а параллельных $C_{пар}$ – на более высокой частоте ($f_{в \text{ ООС}} > f_v$) (см. усилитель с RC-связью).

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПИ ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ ЭЛЕМЕНТОВ

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1.1 Исследование электрических процессов в цепи однофазного переменного тока, содержащей последовательно соединенные активное, индуктивное и емкостное сопротивления, при изменении частоты приложенного напряжения.

1.2 Изучение явления резонанса напряжений.

1.3 Опытная проверка второго закона Кирхгофа.

2 ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Работа выполняется на лабораторном стенде типа 17Д-02 с использованием накладной панели 1–4 (Рисунок 1).

На панели управления лабораторного стенда (наклонная панель черного цвета) расположены выходные гнезда и органы управления источников сигнала, входные гнезда и органы управления измерительных приборов. В верхней части вертикальной стойки расположены стрелочные индикаторы измерительных приборов. Нижняя часть стойки предназначена для установки сменных накладных панелей, с помощью которых производится сборка исследуемых схем.

В данной работе в качестве источника входного сигнала используется генератор синусоидального напряжения (ГС) с регулируемой амплитудой и частотой выходного напряжения. Плавное изменение амплитуды сигнала ГС осуществляется помощью рукоятки "Амплитуда", ступенчатое – с помощью переключателя рода работ ГС (в положении ГН 1:1 – максимальное выходное напряжение ГС ~ 4 В; в положении ГН 1:10 $\sim 0,4$ В; в положении ГТ1 и ГТ2 источник сигнала работает в режиме генератора тока).

Плавное изменение частоты входного сигнала осуществляется с помощью рукоятки "Частота", ступенчатое – переключателем "Диапазон".

Измерение частоты сигнала, подаваемого на вход исследуемой схемы, осуществляется с помощью встроенного частотомера "

Изм.Ч.", входные гнезда и переключатель диапазонов которого также расположены на наклонной панели управления стенда. На этой же панели расположены входные гнезда и переключатели выбора режима и пределов измерения универсальных милливольтамперметров МВА1 и МВА2.

Сборка схемы осуществляется гибкими проводами с однополюсными вилками на концах. Порядок сборки схемы и подключения измерительных приборов изложен в следующем разделе.

3 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

3.1 Установить на стенд накладную панель 1 – 4.

3.2 Установить элементы исследуемой цепи (R_1 , L_1 , C_1) в гнезда накладной панели в соответствии со схемой, изображенной на этой панели. Элементы схемы выбираются из числа имеющихся в кассете в соответствии с индивидуальным заданием преподавателя или одним из вариантов таблицы 1.

Таблица 1 – Варианты заданий

| Вариант | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| R_1 Ом | 100 | 100 | 100 | 75 | 75 | 75 | 51 | 51 | 51 |
| U_1 В | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 1,2 | 1,5 | 1,8 | 1,0 | 1,1 | 1,2 |
| $C_1 = 0,15 - 0,25$ мкФ; параметры катушки R_k и L_k указаны на ее корпусе | | | | | | | | | |

3.3 Подключить источник переменного напряжения (генератор сигнала ГС) к гнездам ГС накладной панели 1 – 4.

ПРИМЕЧАНИЕ 1 – При подключении ГС и измерительных приборов необходимо следить за тем, чтобы низко потенциальные ("заземленные") точки схемы (обозначенные на стенде знаком "⊥") были соединены с низко потенциальными гнездами ("⊥") соответствующего измерительного прибора. Переключатель рода работы источника ГС установить в положение ГН 1:1; переключатель "Диапазон" – в положение 10 кГц.

3.4 Для измерения напряжения питания схемы подключить измерительный прибор МВА2 (гнездо "~" – к верхнему гнезду U_1 (PV1) на схеме накладной панели; другим проводом соединить "заземленные" точки (⊥) прибора МВА2 и схемы). Установить переключатель прибора МВА2 в положение 2,5 В "U." (напряжение полного отклонения прибора 2,5 В, число делений на шкале приборов стенда – 50, цена деления $C_U = 2,5 \text{ В} / 50 \text{ дел} = 0,05 \text{ В/дел}$).

3.5 Для измерения силы тока в исследуемой цепи I_1 подключить прибор МВА1 к соответствующим гнездам накладной панели (РА1)

(См. примечание 1). Переключатель прибора МВА1 установить в положение 25 мА "I" (ток полного отклонения 25 мА, цена деления $C_I = 25\text{мА}/50\text{дел} = 0,5 \text{ мА/дел}$). Переключатель на пульте управления между приборами АВ2 и МВА1 необходимо установить в нижнее положение.

3.6 Для измерения частоты сигнала f , подаваемого на вход исследуемой цепи, необходимо подключить входные гнезда частотомера "Изм.Ч." ко входу схемы (потенциальное гнездо (f_x) необходимо соединить с верхним гнездом PV2 на схеме стенда, "заземленное" гнездо (\perp) – с нижним гнездом PV4). Переключатель диапазона частотомера установить в положение "10 кГц" (в этом случае цена деления частотомера $C_f = 10 \text{ кГц}/50\text{дел} = 0,2 \text{ кГц/дел}$). Переключатель на пульте управления между АВ1 и "Изм.Ч." установить в нижнее положение.

3.7 Подключить сетевой шнур стенда к сети переменного напряжения 220 В, 50 Гц.

3.8 После проверки схемы преподавателем подать питание на лабораторный стенд (включить тумблер "Сеть"). При этом на пульте управления должен загореться сигнальный индикатор включения стенда (светодиод красного цвета).

3.9 Рукояткой "Амплитуда" на пульте управления ГС установить напряжение U_1 в соответствии с вариантом задания.

3.10 Снять зависимость силы тока в цепи I_1 от частоты сигнала f . Сначала необходимо определить частоту резонанса.

ПРИМЕЧАНИЕ 2 – От точности настройки резонансного режима схемы и измерения частоты резонанса зависят результаты работы.

Плавно изменяя частоту генератора сигнала рукояткой "частота", расположенной на панели управления стенда в зоне ГС, установить частоту, при которой сила тока в исследуемой цепи I_1 максимален. (Диапазон частот генератора и предел измерения "Изм.Ч." – 10 кГц). Записать значения силы тока и частоты резонанса $f_{\text{рез}}$ в соответствующую графу таблицы 2. Затем, изменяя частоту в соответствии с указанными в этой таблице значениями f , измерить и записать значения силы тока в цепи I_1 . Напряжение питания U_1 для всех точек должно соответствовать варианту задания.

Проверка II закона Кирхгофа

Для исследуемой цепи II закон Кирхгофа имеет вид

$$\vec{U}_1 = \vec{U}_{R1} + \vec{U}_{Rk} + \vec{U}_L + \vec{U}_C = \vec{U}_{R1} + \vec{U}_K + \vec{U}_C$$

Для проверки этого закона можно построить векторную диаграмму для нескольких экспериментальных точек (по указанию преподавателя) и сравнить значение приложенного напряжения U_1 с результатами определения U_1 по векторной диаграмме. Пример построения векторной диаграммы приведен на рисунке 2 ($f < f_{\text{рез}}$).

4 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 4.1 Название и номер работы.
- 4.2 Номер группы, Ф.И.О. студента и преподавателя.
- 4.3 Принципиальная схема исследуемой цепи.
- 4.4 Таблица опытных и расчетных данных.
- 4.5 Резонансные кривые (зависимости $U_L(f)$, $U_{C1}(f)$, $I_1(f)$ на одном рисунке и в одинаковом масштабе для $U_L(f)$ и $U_{C1}(f)$).
- 4.6 Векторные диаграммы и результаты проверки II закона Кирхгофа (для точек, заданных преподавателем).
- 4.7 Выводы в соответствии с целью работы.

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

При защите данной работы студенты должны ответить на следующие вопросы (вид схемы – произвольная цепь с последовательно соединенными R, L, C элементами).

- 5.1 Как рассчитать полное сопротивление цепи.
- 5.2 Как записать II закон Кирхгофа.
- 5.3 Как построить векторную диаграмму.
- 5.4 От чего и как зависит сдвиг фаз между током и напряжением цепи.
- 5.5 При каких условиях в цепи возникает резонанс.
- 5.6 Как построить векторную диаграмму при резонансе.
- 5.7 Какими способами можно получить резонанс в цепи.
- 5.8 Как изменяется резонансная частота при увеличении (уменьшении) L и C .
- 5.9 Перечислите свойства (особенности) цепи при резонансе

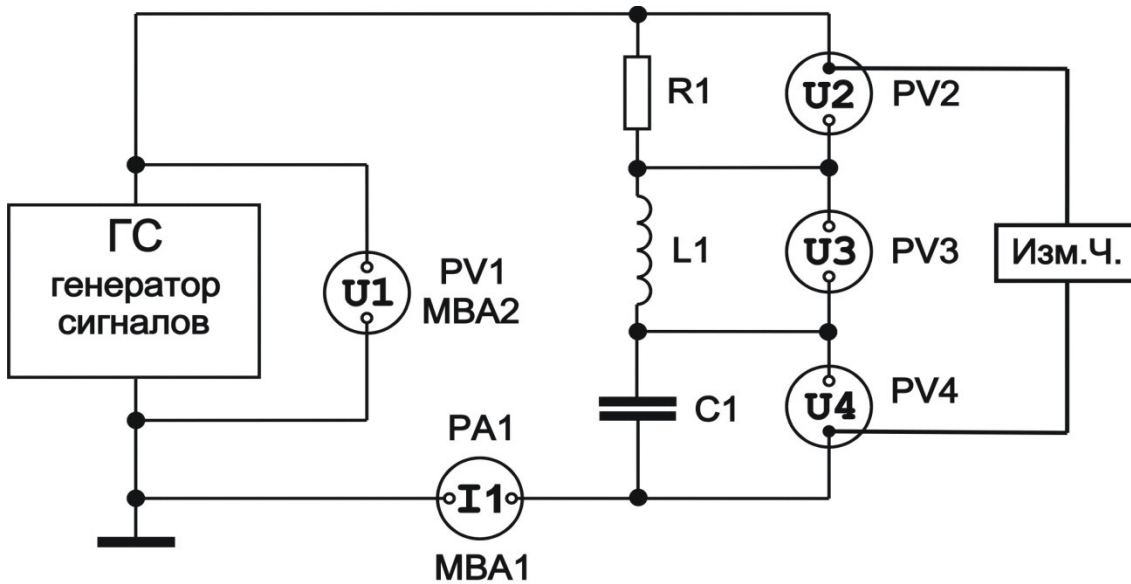


Рисунок 2 Схема исследования цепи однофазного переменного тока при последовательном соединении приемников

Таблица 2 Результаты измерения и расчета параметров цепи переменного тока при последовательном соединении элементов

| Параметры элементов схемы: $R_1 = \dots \text{Ом}$; $C_1 = \dots \text{мкФ}$; $R_k = \dots \text{Ом}$; $L_k = \dots \text{Гн}$ | | | | | | | |
|---|--|----------|---|-------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Наименование величины | Расчетное соотношение | Ед. изм. | Значения измеренных и рассчитанных величин | | | | |
| Приложенное напряжение | U_1 | В | $U_1 = \dots \text{В}$, ($U_1 - \text{const}$) | | | | |
| Частота сигнала | f | кГц | $\sim 0.5 f_{\text{рез}}$ =..... | $\sim 0.7 f_{\text{рез}}$ =..... | $f = f_{\text{рез}}$ =..... | $\sim 1.2 f_{\text{рез}}$ =..... | $\sim 1.5 f_{\text{рез}}$ =..... |
| Сила тока в цепи | I_1 | А | | | | | |
| Индуктивное сопротивление катушки | $X_L = 2\pi f L_k$ | Ом | | | | | |
| Индуктивное падение напряжения | $U_L = I_1 X_L$ | В | | | | | |
| Емкостное сопротивление конденсатора | $X_C = \frac{1}{2\pi f C}$ | Ом | | | | | |
| Емкостное падение напряжения | $U_C = I_1 X_C$ | В | | | | | |
| Эквивалентное реактивное сопротивление цепи | $X_{\Sigma} = X_L - X_C$ | Ом | | | | | |
| Угол сдвига фаз между током и напряжением | $\varphi = \arctg \frac{X_{\Sigma}}{R_{\Sigma}}$ $R_{\Sigma} = R_1 + R_k$ | град | | | | | |
| Полное сопротивление цепи | $Z = \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2}$ | Ом | | | | | |

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПИ ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОМ ВКЛЮЧЕНИИ ПРИЕМНИКОВ

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение поведения цепи с параллельным соединением приемников при изменении частоты приложенного напряжения.

Изучение явления резонанса в цепи с параллельным соединением приемников.

Проверка действия закона Кирхгофа при параллельном соединении приемников.

2 ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Работа выполняется на лабораторном стенде 17Д-02 с применением накладной панели 1.5 (см. рисунок 1).

В качестве источника питания исследуемой схемы используется генератор синусоидального напряжения с регулируемой амплитудой и частотой (ГС). Органы управления работой и выходные гнезда генератора расположены на наклонной панели стенда.

Переключатель рода работы позволяет задавать следующие режимы работы:

– режим источника напряжения с двумя пределами регулирования напряжения (ГН 1:1 – от 0,7 до 4 В и ГН 1:10 – от 0,07 до 0,4 В);

– режим источника тока также с двумя пределами регулирования (ГТ1 и ГТ2).

В работе используется источник напряжения (ГН 1:1). Плавное регулирование напряжения осуществляется рукояткой “Амплитуда”. Изменение частоты производится в четырех поддиапазонах, устанавливаемых переключателем “Диапазон”. Для плавной регулировки служит рукоятка “Частота”.

Для измерения переменного напряжения и силы тока используются встроенные в стенд электронные милливольтамперметры переменного тока МВА-1 и МВА-2. Входные (измерительные) гнезда и переключатели пределов измерения силы тока и напряжения расположены на наклонной панели стенда в секторах с обозначением МВА-1 и МВА-2.

Измерение частоты осуществляется встроенным электронным частотомером. Входные (измерительные) гнезда и переключатель пределов измерения частотомера расположены на наклонной панели стенда в секторе с обозначением “Изм.Ч”.

Отсчет измеряемых величин производится по стрелочным приборам, расположенным в верхней части вертикальной стойки стенда.

В качестве приемников энергии в работе применяются резистор, катушка индуктивности и конденсатор из кассеты с набором электрических деталей, выдаваемых при выполнении работы.

Сборка исследуемой схемы производится с помощью гибких проводников с однополюсными вилками на обоих концах.

3 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

3.1 Установить (вдвинув в пазы вертикальной стойки стенда) накладную панель 1-5 (17Д-02).

3.2 Вынуть из кассеты с деталями катушку индуктивности, резистор и конденсатор. Выбор номинальных значений сопротивления и емкости конденсатора производится по указанию преподавателя. Один из возможных вариантов: сопротивление резистора – 510 Ом, емкость конденсатора – 0,15 мкФ. Установить выбранные элементы в соответствующие по схеме гнезда накладной панели.

3.3 С помощью выданных вместе с кассетой проводников подключить источник переменного напряжения ГС (на наклонной панели стенда) к исследуемой схеме (гнезда ГС накладной панели). При этом низкопотенциальные (имеющие малое сопротивление по переменному току относительно корпуса стенда) гнезда, помеченные знаком “⊥”, должны быть соединены одним проводом. (Такая необходимость обусловлена особенностью построения схем электронных узлов стенда). Переключатель рода работ источника ГС поставить в положение ГН-1, переключатель “Диапазон” – в положение 10 кГц.

3.4 Для контроля напряжения источника ГС и его частоты к нему одновременно должны быть подключены два прибора: частотомер и вольтметр. На накладной панели предусмотрены лишь два гнезда для подключения вольтметра (гнезда PV1). Чтобы обеспечить подключение обоих приборов, рекомендуется воспользоваться разветвительной колодкой АЗ из набора деталей. Ее следует установить на входные гнезда прибора МВА-2. Затем надо подключить этот прибор к гнездам накладной панели (PV-1), соединив их проводниками с гнездами колодки. Оставшиеся свободными гнезда колодки следует соединить с входными гнездами частотомера – ”Изм.Ч”. При подключении необходимо соблюдать те же правила, что и при подключении источника (см. п. 3.4) – низкопотенциальные гнезда, помеченные знаками “⊥” соединяются одним проводом.

3.5 Переключатель пределов измерения вольтметра МВА-2 поставить в положение 2,5 В (цена деления $C_U=0,05$ В/дел), переключатель пределов измерения частотомера (рукоятка “Диапазон”) поставить в положение 10 кГц (цена деления $C_f=0,2$ кГц/дел). Рычажок переключателя режима работы стрелочного прибора, находящийся на пульте управления немного выше входных гнезд частотомера (“Изм.Ч”) должен быть в нижнем положении.

3.6 Подключить миллиамперметр для измерения силы токов (в качестве миллиамперметра применяется прибор МВА-1). Для этого надо соединить входные гнезда МВА-1 на наклонной панели пульта управления стенда с гнездами РА-1 накладной панели с исследуемой схемой. При соединении, как и в предыдущих случаях, проследить, чтобы низкопотенциальные гнезда (помеченные знаком “⊥”) были соединены одним проводом.

Переключатель пределов измерения МВА-1 установить в положение 25 мА (цена деления $C_I=0,5$ мА/дел).

Рычажок переключателя режима работы стрелочного прибора, находящийся на пульте управления между секторами АВ-1 и МВА-1 должен быть в нижнем положении.

3.7 В работе для измерения силы токов предусматривается применение одного прибора, попеременно измеряющего силу токов катушки, конденсатора, резистора и общий ток цепи.

Это удобно делать следующим образом: проводниками, по возможности короткими, замкнуть гнезда, предназначенные для подключения приборов РА2, РА3 и РА4, расположенные на накладной панели: для измерения силы токов отдельных элементов использовать уже подключенный (п.3.6.) миллиамперметр МВА-1, попеременно удаляя (вытаскивая из своих гнезд) “лишние” элементы, оставляя тот элемент, силу тока через который надо измерить. Например, для измерения силы тока через резистор надо удалить катушку и конденсатор. Поскольку приложенное напряжение постоянно, сила токов отдельных элементов, определяемые законом Ома, не зависят от наличия или отсутствия других элементов.

3.8 Проверить, подключен ли сетевой кабель к сети 220 В (в розетку) и если нет, то включить его. Пригласить преподавателя для проверки правильности сборки схемы и получения дополнительных указаний. Первое включение рекомендуется делать в присутствии преподавателя. Включение производится сетевым выключателем, расположенным на левом краю пульта управления. О включении стенда сигнализирует свечение индикатора красного цвета.

3.9 Установить напряжение питания исследуемой цепи в соответствии с вариантом задания по указанию преподавателя. Установка напряжения производится рукояткой “Амплитуда”, расположенной в секторе “ГС” пульта управления. Контроль значения

устанавливаемого напряжения осуществляется по прибору МВА-2. Для правильной установки не забудьте учесть цену деления прибора. (Она определяется как отношение предела измерений прибора, указываемого переключателем пределов, к общему числу делений стрелочного измерителя, то есть к числу, соответствующему конечному оцифрованному делению шкалы измерителя).

3.10 Найти частоту, примерно соответствующую резонансу токов. Для этого надо плавно изменять частоту подаваемого на схему напряжения (с помощью рукоятки “Частота” в секторе ГС пульта управления), наблюдая за изменением общего тока цепи. При монотонном изменении частоты от любого из крайних ее значений на частоте, близкой к резонансу токов, общий ток принимает минимальное значение. Для более точного нахождения частоты резонанса рекомендуется после приблизительного ее нахождения отключить (вынуть из своих гнезд) резистор и, изменяя уже в относительно небольших пределах частоту, найти ее значение, соответствующее минимуму силы тока.

Найденное таким образом значение частоты резонанса занести в таблицу 1 ($f = f_{\text{рез}}$).

Вернуть на свое место резистор и записать значение общего тока.

Затем, поочередно оставляя в схеме лишь один элемент (удаляя остальные), записать значения силы токов резистора, катушки и конденсатора.

При измерениях силы тока и частоты не забывайте о цене деления. Методика ее определения одинакова (см. п.3.10).

3.11 Снять зависимость всех четырех токов (общего тока I_1 , силы тока через резистор I_2 , силы тока через катушку I_3 , силы тока через конденсатор I_4) от частоты (см. п. 3.7). Для этого достаточно произвести измерения для резонансной частоты, а также для двух частот меньше резонансной ($\sim 0.6 f_{\text{рез}}$ и $\sim 0.8 f_{\text{рез}}$) и для двух частот больше резонансной ($\sim 1.2 f_{\text{рез}}$ и $\sim 1.4 f_{\text{рез}}$). Поскольку требования к выбору частот не являются строгими, можно ограничиться точностью, достигаемой приближенным умножением “в уме”. Результаты измерений занести в таблицу 1.

4 ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

4.1 По данным таблицы 1 построить зависимости силы токов цепи от частоты: $I_1 = F_1(f)$, $I_2 = F_2(f)$, $I_3 = F_3(f)$, $I_4 = F_4(f)$. Построения следует производить на общем графике в едином масштабе по оси ординат для всех токов. Оси координат должны начинаться с нулевых значений величин, а масштаб должен быть равномерным по длине осей (обычные построения без сдвига осей относительно “0”).

4.2 Провести проверку действия первого закона Кирхгофа для параллельного включения приемников в цепи переменного синусоидального тока :

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_2 + \vec{I}_3 + \vec{I}_4 \quad (1)$$

Поскольку сопротивление (и, соответственно, проводимость) катушки имеют и активную, и реактивную составляющие, то и сила тока катушки I_3 имеет соответствующие составляющие:

$$\vec{I}_3 = \vec{I}_{ka} + \vec{I}_{kp} \quad (2)$$

Эти составляющие можно найти:

$$I_{ka} = I_3 \cos \varphi = I_3 \frac{R_k}{\sqrt{R_k^2 + \omega^2 L_k^2}} \quad (3)$$

$$I_{kp} = I_3 \sin \varphi = I_3 \frac{\omega L_k}{\sqrt{R_k^2 + \omega^2 L_k^2}} \quad (4)$$

где $\omega = 2\pi f$

Значения R_k и L_k указаны на корпусе, в который заключена катушка. Тогда, с учетом векторного характера 1 закона Кирхгофа для действующих значений токов, проверку этого закона следует провести, рассчитав общий ток цепи по формуле:

$$I_1(\text{расч}) = \sqrt{(I_2 + I_{ka})^2 + (I_{kp} + I_4)^2} \quad (5)$$

Проверка заключается в сравнении значений измеренного тока цепи и рассчитанного по этой формуле. В расчетной формуле учитывается активная составляющая проводимости (сопротивления) катушки, обусловленная конечным сопротивлением медного обмоточного провода.

5 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 5.1 Название и номер работы, Ф.И.О. студента, номер группы.
- 5.2 Цели работы.
- 5.3 Схема исследуемой цепи с измерительными приборами.
- 5.4 Таблица опытных и расчетных данных.
- 5.5 Графики зависимостей (п.4.1).
- 5.6 Расчеты для проверки 1 закона Кирхгофа.
- 5.7 Выводы по результатам проверки 1 закона Кирхгофа, по анализу графиков (особенности графиков и причины,

обуславливающие вид зависимостей), а также о причинах и условиях резонанса токов.

6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

6.1 Как формулируется и записывается 1 закон Кирхгофа для исследуемой цепи, подключенной к источнику переменного тока? В чем отличие этой записи от записи этого же закона для цепи постоянного тока?

6.2 Что является условием резонанса токов и в чем проявляется явление резонанса при параллельном соединении элементов?

6.3 Поясните, почему зависимость силы тока в исследуемой цепи от частоты питающего напряжения имеет экстремум.

6.4 В чем отличие в поведении цепи на частотах больше и меньше частоты резонанса?

6.5 Как изменится (качественно) положение точки резонанса на графике зависимости общего тока от частоты, если:

- а) увеличить емкость конденсатора,
- б) увеличить сопротивление резистора,
- в) увеличить индуктивность катушки.

6.6 Как зависят от частоты параметры:

- а) конденсатора,
- б) резистора,
- в) катушки.

6.7 Постройте (качественно) векторную диаграмму токов исследуемой цепи:

- а) для частоты меньшей частоты резонанса,
- б) для частоты большей частоты резонанса,
- в) для частоты резонанса.

6.8 Как зависит угол сдвига фаз между током и напряжением в исследуемой цепи от частоты?

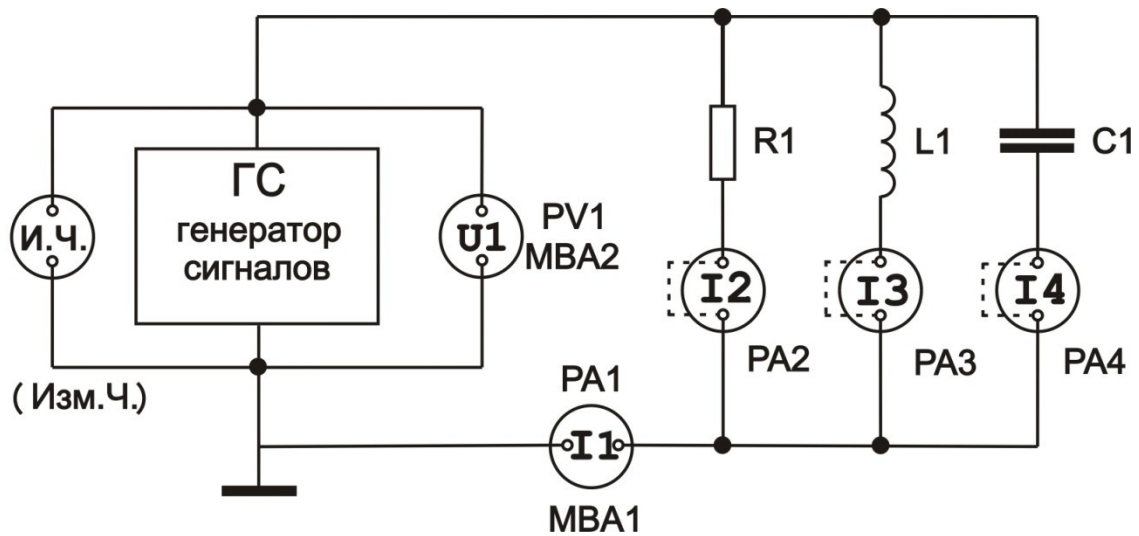


Рисунок 1 Схема для исследования цепи однофазного переменного тока при параллельном включении приемников

Таблица 1 Результаты исследования цепи однофазного переменного тока при параллельном включении приемников

| ВЕЛИЧИНА | ЕД. ИЗМ. | ИЗМЕРЕННЫЕ И РАССЧИТАННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ВЕЛИЧИН | | | | |
|--|----------|---|--|--------------------------------|--|--|
| Напряжение, U_1 | В | $U_1 = \dots\dots\dots$ В ($U_1 = \text{const.}$) | | | | |
| Частота, f | кГц | | | $f = f_{\text{рез}}$ =..... | | |
| Общий ток цепи, I_1 | мА | | | | | |
| Ток через резистор, I_2 | мА | | | | | |
| Ток через катушку, I_3 | мА | | | | | |
| Ток через конденсатор, I_4 | мА | | | | | |
| Полное сопротивление цепи, $Z = U_1 / I_1$ | Ом | | | | | |

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОПОЛУПЕРИОДНОГО И МОСТОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1.1 Изучение структуры и принципа действия однополупериодного и двухполупериодного (мостового) выпрямителей без фильтра и с емкостным фильтром.

1.2 Исследование внешних характеристик выпрямителей.

1.3 Оценка влияния емкостного фильтра на качество выпрямленного напряжения.

2 ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Работа выполняется на лабораторном стенде типа 17Д-02 с использованием накладной панели 1 – 10. Накладная панель устанавливается в нижней части вертикальной стойки стенда.

В верхней части вертикальной стойки расположены стрелочные индикаторы измерительных приборов. Входные гнезда и органы управления измерительных приборов расположены на панели управления лабораторного стенда (наклонная панель черного цвета).

В данной работе в качестве источника используется внутренний генератор переменного напряжения с частотой 50 Гц. Выходные клеммы этого генератора подключены ко входу выпрямителя внутри стенда.

В качестве нагрузки используется переменный резистор (потенциометр), который подключается к выходным гнездам выпрямителя. Изменяя сопротивления этого потенциометра можно плавно регулировать силу тока нагрузки.

Для изучения осциллограмм выпрямленного напряжения используется электронный осциллограф С1-68 (или С1-67). Вход осциллографа подключается к выходу исследуемого выпрямителя с помощью коаксиального кабеля. Описание органов управления осциллографа и рекомендации по его настройке приведены в описании лабораторной работы № 10.

3 СХЕМА ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

3.1 Установить (вдвинуть в пазы вертикальной стойки стенда) накладную панель 1-10.

3.2 Собрать схему мостового выпрямителя: Установить в соответствующие гнезда в правой части накладной панели четыре диода (Д2, Д3, Д4, Д5) в соответствии с обозначениями на корпусе диодов и на схеме мостового выпрямителя.

3.3 ВНИМАНИЕ. Неправильное включение любого из диодов приводит к тому, что в одном из плеч мостового выпрямителя оба диода будут открыты, т.е. выход генератора будет практически закорочен. Это может привести к выходу из строя диодов или генератора.

3.4 Подключить к схеме мостового выпрямителя измерительные приборы. Для измерения постоянной составляющей силы тока нагрузки I_H используется миллиампервольтметр АВ1 (РА2 на схеме накладной панели).

Стрелочный индикатор этого прибора – первый слева в ряду стрелочных индикаторов в верхней части вертикальной стойки. Входные гнезда этого прибора расположены на панели управления стенда и имеют обозначения полярности «+» и «-». Для подключения АВ1 необходимо, учитывая полярность, соединить гибкими проводниками входные гнезда этого прибора с гнездами РА2 на схеме мостового выпрямителя накладной панели стенда.

Рычаг переключения режима работы стрелочного прибора, находящийся на пульте управления между секторами АВ1 и Изм.Ч., установить в верхнее положение. Переключатель пределов измерения АВ-1 установить в положение 10 мА (цена деления – 0.2 мА/дел.).

Для измерения постоянной составляющей выходного напряжения U_H используется миллиампервольтметр АВ2 (РV4 на схеме накладной панели). Стрелочный индикатор этого прибора – второй слева в ряду стрелочных индикаторов в верхней части вертикальной стойки. Входные гнезда этого прибора расположены на наклонной панели пульта управления стенда и имеют обозначения полярности «+» и «-». Для подключения АВ2 необходимо, учитывая полярность, соединить гибкими проводниками входные гнезда этого прибора с гнездами РV4 на схеме мостового выпрямителя накладной панели стенда.

Рычаг переключения режима работы стрелочного прибора, находящийся на пульте управления между секторами АВ2 и МВА1, установить в верхнее положение. Переключатель пределов измерения АВ2 установить в положение 25 В (цена деления – 0.5 В/дел.).

Вставить разветвительную колодку А3 в гнезда R_H схемы мостового выпрямителя на накладной панели стенда. К одной паре гнезд колодки А3 подключить потенциометр R_H , а ко второй – коаксиальный кабель осциллографа (земляной вывод кабеля (длинный) должен быть подключен к нижнему гнезду колодки А3).

3.5 После проверки схемы преподавателем, включить стенд (тумблер «Сеть» слева на пульте управления). При этом на пульте управления должен загореться сигнальный индикатор включения стенда (светодиод красного цвета).

Подготовить к работе электронный осциллограф (описание органов управления осциллографа и рекомендации по его настройке приведены в описании лабораторной работы № 10).

4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

4.1 Снять внешнюю характеристику мостового выпрямителя без фильтра. (Внешняя характеристика – зависимость постоянной составляющей выходного напряжения U_H от постоянной составляющей силы тока в нагрузке I_H). Плавно поворачивая рукоятку потенциометра R_H , установить заданные преподавателем значения силы тока нагрузки и для каждого из них измерить выходное напряжение U_H . Полученные результаты занести в таблицу 1.

4.2 Включить конденсатор фильтра – вставить, соблюдая полярность, колодку с электролитическим конденсатором в гнезда C_2 накладной панели (емкость конденсатора 10 или 50 мкФ – по указанию преподавателя). Снять внешнюю характеристику мостового выпрямителя при заданных преподавателем значениях силы тока нагрузки.

4.3 Снять внешнюю характеристику однополупериодного выпрямителя без фильтра.

Если в мостовой схеме выпрямителя удалить любой из диодов, то в один из полупериодов выпрямляемого напряжения цепь будет разорвана, т.е. выпрямитель становится однополупериодным. Поэтому можно не собирать схему однополупериодного выпрямителя, а вторую часть работы выполнить, используя мостовую схему без одного любого диода. Удалив из схемы один диод и конденсатор, снять внешнюю характеристику однополупериодного выпрямителя без фильтра при заданных преподавателем значениях силы тока нагрузки.

4.4 Включить конденсатор фильтра – вставить, соблюдая полярность, колодку с электролитическим конденсатором в гнезда C_2 накладной панели и снять внешнюю характеристику однополупериодного выпрямителя с фильтром при заданных преподавателем значениях силы тока нагрузки.

4.5 Измерить с помощью осциллографа амплитуду пульсаций напряжения на нагрузке $U_{П\text{ МАХ}}$ для обоих типов выпрямителя без фильтра и с емкостным фильтром. Для каждого варианта схемы измерить постоянную составляющую выходного напряжения (среднее значение) U_H . Результаты измерения амплитуды пульсации и постоянной составляющей занести в таблицу 2. Для объективного

сравнения результатов все измерения должны производиться при одинаковой силе тока нагрузки (например, 4 мА или по указанию преподавателя).

ПРИМЕЧАНИЕ – При определении величины пульсации $U_{П\text{ МАХ}}$ рукоятка «УСИЛЕНИЕ» осциллографа должна быть повернута против часовой стрелки до упора. Положение переключателя чувствительности ВОЛЬТ/ДЕЛ следует выбирать самостоятельно так, чтобы вертикальный размер изображения сигнала был в диапазоне 1 – 6 клеток шкалы осциллографа.

5 УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

5.1 По данным таблицы 1 на одном графике в линейном масштабе построить внешние характеристики четырех вариантов выпрямителей. Сделать выводы о соотношении постоянной составляющей выходного напряжения однополупериодного и мостового выпрямителей и о причинах увеличения выходного напряжения при использовании емкостного фильтра.

5.2 Рассчитать значения коэффициента пульсации для всех вариантов выпрямителей. Сделать выводы об изменении коэффициента пульсации при подключении емкостного фильтра.

6 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 6.1 Название и номер работы.
- 6.2 Номер группы, Ф.И.О. студента.
- 6.3 Таблицы данных эксперимента и результатов расчета.
- 6.4 Четыре внешние характеристики (на одном графике).
- 6.5 Выводы по работе.

7 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 7.1 Принцип действия однополупериодного выпрямителя.
- 7.2 Принцип действия мостового выпрямителя.
- 7.3 Принцип действия емкостного фильтра.
- 7.4 Что называется внешней характеристикой выпрямителя и как она снимается.
- 7.5 Сравнительный анализ внешних характеристик обоих выпрямителей.
- 7.6 Что называется коэффициентом пульсации выпрямленного напряжения и как его определить экспериментально.
- 7.7 Как влияет емкостной фильтр на коэффициент пульсации и величину выпрямленного напряжения.

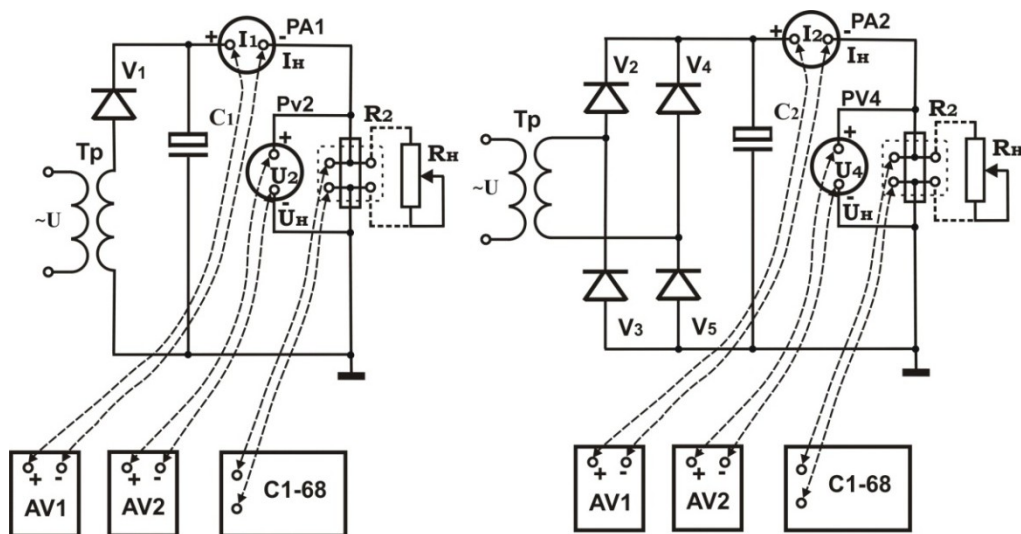


Рисунок 1 Схема лабораторной установки

Таблица 1 Внешние характеристики однополупериодного и мостового выпрямителей $U_H = f(I_H)$

| | Однополупериодный | | | | Мостовой | | | |
|---|-------------------|-----------|------------|-----------|-------------|-----------|------------|-----------|
| | Без фильтра | | С фильтром | | Без фильтра | | С фильтром | |
| | I_H (мА) | U_H (В) | I_H (мА) | U_H (В) | I_H (мА) | U_H (В) | I_H (мА) | U_H (В) |
| 1 | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | |

Таблица 2 Коэффициент пульсации однополупериодного и мостового выпрямителей

| | Однополупериодный | | Мостовой | |
|-----------------------------------|-------------------|------------|-------------|------------|
| | Без фильтра | С фильтром | Без фильтра | С фильтром |
| h , дел | | | | |
| m , Вольт / дел | | | | |
| U_H (В) | | | | |
| $U_{П\text{ МАКС}} = 0.5 h m$ (В) | | | | |
| $K_{П} = U_{П\text{ МАКС}} / U_H$ | | | | |

h – максимальный размер изображения сигнала на экране осциллографа (дел – большая клетка сетки на экране осциллографа).

m – чувствительность осциллографа (положение переключателя ВОЛЬТ/ДЕЛ).

U_H – постоянная составляющая выпрямленного напряжения.

$U_{П\text{ МАКС}}$ – амплитуда пульсации выпрямленного напряжения.

$K_{П}$ – коэффициент пульсации выпрямленного напряжения.

Литература по курсу «Электротехника и электроника»

Основная

1. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника.- М.: Высш.шк., 2003.- 542 с.
2. Иванов И.И. Электротехника.- СПб., М., Краснодар: Лань, 2006.- 496 с.
3. Новиков Ю.Н. Электротехника и электроника. Теория цепей и сигналов, методы анализа: Учеб. пособие.- М., СПб., Нижний Новгород: Питер, 2005.- 384 с.
4. Изьюрова Г.И., Кауфман М.С. Приборы и устройства промышленной электроники:- М., Высш.школа, 1975.- 368 с.
5. Основы промышленной электроники / Под ред. Е.Г.Герасимова,- М.: Высш. шк., 1986.- 335 с.
6. Цепи однофазного переменного тока. Параллельное соединение приемников: Метод. указания по решению задач в электротехнике символическим методом. /В.ПКатушкин, В.Г.Ващенко; СПбГТИ(ТУ).- СПб., 1999.- 16 с.
7. Цепи однофазного переменного тока. Последовательное соединение приемников: Метод. указания по решению задач в электротехнике символическим методом. /В.ПКатушкин, В.Г.Ващенко; СПбГТИ(ТУ).- СПб., 1999.- 16 с.

Дополнительная

1. ГОСТ Р 52002-2003 Электротехника. Термины и определения основных понятий.
2. ГОСТ 1494-77 Электротехника. Буквенные обозначения основных величин.
3. ГОСТ 21414-75 Резисторы. Термины и определения.
4. ГОСТ 21415-75 Конденсаторы. Термины и определения.
5. ГОСТ 16110-82 Трансформаторы силовые. Термины и определения.
6. ГОСТ 24471-87 Машины электрические вращающиеся. Термины и определения.
7. ГОСТ 15133-77 Приборы полупроводниковые. Термины и определения
8. ГОСТ 20003-74 Транзисторы биполярные. Термины, определения и буквенные обозначения параметров.
9. ГОСТ 12.1.009-76 ССБТ. Электробезопасность. Термины и определения.
10. ГОСТ 12.4.113-82 ССБТ. Работы учебные лабораторные. Общие требования безопасности.

11. ГОСТ 2.710-81 ЕСКД. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах.
12. ГОСТ 2.723-68 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Катушки индуктивности, дроссели, трансформаторы и магнитные усилители.
13. ГОСТ 2.728-74 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Резисторы. Конденсаторы.
14. ГОСТ 2.730-73 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Приборы полупроводниковые.

Контрольные вопросы по курсу «Электротехника и электроника»

1. Синусоидальные величины. Их частота, амплитуда, фаза, начальная фаза. Экономическая целесообразность применения переменных токов.
2. Среднее и действующее значение синусоидальных величин.
3. Векторное изображение синусоидальных ЭДС, напряжений и токов. Представление синусоидальных величин с помощью комплексных чисел.
4. Простейшие цепи переменного тока. Цепь, содержащая активное сопротивление R , индуктивность L , или емкость C .
5. Неразветвленная цепь переменного тока, содержащая R , L , C . Второй закон Кирхгофа. Закон Ома. Активное, реактивное и полное сопротивления цепи. Резонанс напряжений.
6. Разветвленные цепи переменного тока. Первый закон Кирхгофа. Методы расчета токов в разветвленных цепях. Резонанс токов.
7. Мощность в цепи переменного тока. Мгновенная мощность. Активная, реактивная и полная мощности.
8. Многофазные системы. Экономические преимущества трехфазных систем.
9. Соединение приемников «звездой» с нейтральным проводом и без него. Назначение нейтрального провода. Связь фазных и линейных токов и напряжений. Влияние несимметрии нагрузки на линейные и фазные напряжения.
10. Катушка со стальным сердечником в цепи переменного тока. Назначение ферромагнитных сердечников. Потери в ферромагнитном сердечнике, методы их снижения.
11. Устройство и принцип действия трансформатора. Экономические и технические достоинства трансформатора.
12. Работа трансформатора под нагрузкой. Основные уравнения трансформатора.
13. Внешняя характеристика трансформатора. Влияние характера нагрузки на вид внешней характеристики.
14. Механические характеристики двигателей и исполнительных механизмов. Условия устойчивой работы электропривода.
15. Устройство и принцип действия трехфазного асинхронного двигателя. Частота вращения магнитного поля статора, частота вращения ротора, скольжение.
16. Механическая характеристика асинхронного двигателя (МХ), характерные точки, формулы для $M(\omega_r)$, $M(\text{пуск})$, $M(\text{max})$, влияние активного сопротивления цепи ротора на вид МХ.
17. Способы регулирования частоты вращения асинхронного двигателя.
18. Способы пуска асинхронных двигателей, их применение.

19. Устройство двигателя постоянного тока. Классификация двигателей постоянного тока по способу возбуждения.
20. Принцип действия двигателя постоянного тока. Уравнение цепи якоря двигателя постоянного тока. Зависимость момента от тока якоря и от магнитного потока.
21. Характеристики двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением, пуск, регулирование частоты вращения, применение.
22. Характеристики двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением, пуск, регулирование частоты вращения, применение.
23. Назначение и структурная схема выпрямительного устройства,
24. Основные параметры и характеристики выпрямителей.
25. Однополупериодная схема выпрямления переменного тока. Временные диаграммы и основные соотношения.
26. Мостовая схема выпрямления переменного тока. Основные соотношения, временные диаграммы.
27. Фильтры выпрямителей. Назначение, понятие о коэффициенте фильтрации.
28. Принцип действия емкостного фильтра, основные расчетные соотношения, временные диаграммы.
29. Принцип действия индуктивности в качестве фильтра, временные диаграммы.
30. Внешняя характеристика выпрямителя.
31. Основные параметры и характеристики усилителей. Понятие об эквивалентном источнике сигнала.
32. Транзистор, назначение, преимущества и недостатки транзисторных схем, устройство, обозначение на электрических схемах.
33. Принцип действия биполярного транзистора.
34. Схема усилителя с общим эмиттером. Назначение элементов схемы.
35. Усилитель с общим коллектором. Схема, основные параметры, особенности.
36. Многокаскадные усилители. Особенности, классификация по виду четырехполюсников связи.
37. Усилители с емкостной связью. Схема усилителя, назначение элементов, АЧХ, особенности.
38. Усилители с гальванической связью. Особенности, понятие о дрейфе нуля и методах борьбы с ним.
39. Обратные связи в усилителях. Классификация обратных связей. Коэффициент усиления усилителя с обратной связью. Влияние отрицательной обратной связи на параметры и характеристики усилителя

